



UNIVERSITAS INDONESIA

**SIMULASI PELEPASAN BEBAN DENGAN MENGGUNAKAN
RELE FREKUENSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK
CNOOC SES Ltd.**

SKRIPSI

**ARI NUGRAHENI
07 06 163602**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**SIMULASI PELEPASAN BEBAN DENGAN MENGGUNAKAN
RELE FREKUENSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK
CNOOC SES Ltd.**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**ARI NUGRAHENI
07 06 163602**

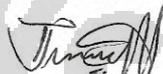
**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Ari Nugraheni

NPM : 0706163602

Tanda Tangan : 

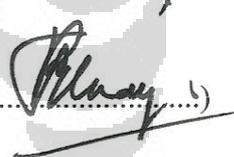
Tanggal : 27 Juni 2011

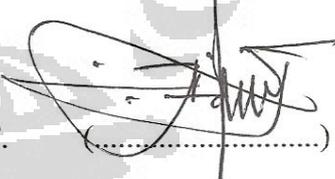
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Ari Nugraheni
NPM : 0706163602
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Simulasi Pelepasan Beban Dengan Menggunakan
Rele Frekuensi Pada Sistem Tenaga Listrik
CNOOC SES Ltd.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir Rudy Setiabudy, DEA (.....)

Penguji : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, M.T. (.....)

Penguji : Aji Nur Widyanto, S.T., M.T. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 27 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena dengan rahmat dan karunia-Nya lah penulis dapat menyelesaikan buku skripsi ini. Mulai dari proses pembelajaran dan analisa yang telah dijalani dan proses penyusunan dari buku skripsi ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA selaku pembimbing telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Bp. Tompiner Naibaho, Bp. Nurhadi Prasetyo dan Bp. Arif Kapa yang telah menyempatkan waktu untuk mengarahkan saya saat pengambilan data di CNOOC SES Ltd.
3. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
4. Seluruh keluarga besar Civitas Akademika Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 27 Juni 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ari Nugraheni
NPM : 0706163602
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada **Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

SIMULASI PELEPASAN BEBAN DENGAN MENGGUNAKAN RELE
FREKUENSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK CNOOC SES Ltd.

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 27 Juni 2011

Yang Menyatakan



(Ari Nugraheni)

ABSTRAK

Nama : Ari Nugraheni
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Simulasi Pelepasan Beban dengan Menggunakan Rele
Frekuensi pada Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd.

Skripsi ini membahas tentang skema pelepasan beban menggunakan rele frekuensi pada sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. yang mempunyai pembangkit listrik tenaga gas. Pelepasan beban dilakukan sebagai usaha memperbaiki kestabilan sistem yang terganggu karena beban lebih. Salah satu komponen stabilitas sistem yang mampu menjadi referensi pelepasan beban adalah frekuensi. Pelepasan beban diharapkan dapat memulihkan frekuensi dengan cepat dan jumlah beban yang dilepaskan seminimal mungkin. Oleh sebab itu diperlukan beberapa pengaturan pada rele frekuensi seperti waktu tunda rele, frekuensi kerja dan besar beban dilepaskan. Dengan menggunakan persamaan swing generator pada beberapa perhitungan, didapatkan nilai frekuensi kerja untuk rele frekuensi yang sesuai dengan sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. dan nilai beban lepas yang paling efektif pada setiap tahap pelepasan beban. Untuk membuktikan keefektifan dari skema pelepasan beban, dibuatlah beberapa simulasi generator lepas yang menghasilkan ketidakseimbangan daya aktif antara daya yang dibangkitkan dan daya yang dibutuhkan beban dengan menggunakan ETAP 7.0. Dari simulasi, frekuensi sistem dapat pulih sekitar 3-9 detik setelah gangguan tergantung pada besar kelebihan beban pada sistem tenaga listrik.

Kata kunci :

Pelepasan beban, frekuensi, pembangkit listrik tenaga gas, rele frekuensi

ABSTRACT

Name : Ari Nugraheni
Study Program : Electrical Engineering
Title : Load Shedding Simulation Using Under Frequency Relay in
CNOOC SES Ltd. power system

This undergraduate thesis discusses about load shedding scheme using under frequency relay in CNOOC SES Ltd. electric power system which have gas power plant. Load shedding is carried out as an effort to restore disturbed system stability because of overload condition. One of electric system stability components, which can be a reference for load shedding, is frequency. Load shedding is expected to restore generator frequency rapidly and the amount of load shed as minimum as possible. Therefore, it is needed under frequency relay setting such as relay time delay, frequency trip and percentage of released load. By using swing generator equation on some calculation, it is obtained the values of frequency for under frequency relay which is proper with the power system and the number of the most effective load shed in every load shedding scheme. To prove the effectiveness of the under frequency load shedding scheme, the undergraduate thesis makes some simulations about generators shed to make unbalance active power between generation district and load district by using ETAP 7.0 software. From simulation, the system frequency is able to recover in 3 – 9 seconds after disturbance depends on the magnitude of overload in the power system.

Key words:

Load shedding, frequency, gas power plant, under frequency relay

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR SIMBOL	xvi
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan	2
1.3 Pembatasan Masalah.....	2
1.4 Metode Penelitian	3
1.5 Langkah-langkah Penulisan	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
2. SISTEM PELEPASAN BEBAN.....	6
2.1 Sistem Pembangkitan Listrik.....	6
2.1.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron	7
2.1.2 Mekanisme Kerja PLTG.....	9
2.2 Gangguan Beban Lebih.....	11
2.2.1 Penanggulangan Gangguan Beban Lebih	11
2.3 Hubungan Antara Frekuensi dan Daya Aktif	12
2.4 Pelepasan Beban	14
2.4.1 Akibat Beban Lebih pada Sistem Tenaga Listrik.....	15
2.4.2 Pelepasan Beban Akibat Penurunan Frekuensi.....	16
2.4.3 Syarat Pelepasan Beban	17
2.5 Penurunan Frekuensi Akibat Beban Lebih.....	17
2.5.1 Laju Penurunan Frekuensi	18
2.5.2 Pengaruh Konstanta Inersia Terhadap Penurunan Frekuensi.....	20
2.5.3 Pengaruh Kelebihan Beban	23
2.6 Standar Frekuensi Kerja Generator Turbin Gas	24
2.6.1 IEEE Standard C37-106 2003	25
2.7 Pengaturan Under Frequency Relay	26
2.7.1 Perkiraan Tahapan Frekuensi Acuan.....	27
2.7.1.1 Penentuan Frekuensi Acuan Tahap Pertama.....	27
2.7.1.2 Penentuan Frekuensi Acuan Tahap Kedua dan Seterusnya	28
2.7.1.3 Pengaturan Frekuensi Minimum.	30
2.7.2 Koordinasi Under Frequency Relay dan Pemutus Tenaga	31
2.7.3 Pengaturan Waktu Tunda.....	31

2.8	Prioritas Beban	32
2.8.1	Jenis Beban yang Dilepaskan.....	32
2.8.2	Perhitungan Beban yang Dilepaskan dan Frekuensi yang Diharapkan Setelah Pelepasan Beban.....	33
2.9	ETAP (Electrical Transient Analysis Program)	34
2.9.1	Analisa Kestabilan Kondisi Transien	35
3.	PELEPASAN BEBAN FREKUENSI RENDAH PADA SISTEM TENAGA LISTRIK CNOOC SES Ltd. DENGAN TEGANGAN OPERASI 13,8 kV	36
3.1	Unit Bisnis CNOOC SES Ltd.....	36
3.2	Sistem Tenaga Listrik pada Unit Bisnis CNOOC SES Ltd.	37
3.2.1	Sistem Pembangkit Tenaga Listrik.....	38
3.2.1.1	Pengaturan Generator	40
3.2.2	Sistem Transmisi dan Distribusi.....	40
3.3	Jenis Beban pada Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd.	41
3.3.1	Beban Unit Bisnis Area Selatan (SBU)	43
3.3.2	Beban Unit Bisnis Area Tengah (CBU)	44
3.3.3	Beban Unit Bisnis Area Utara (NBU)	45
3.4	Skema Pelepasan Beban Akibat Frekuensi Rendah CNOOC SES Ltd. ...	46
4.	PERANCANGAN SIMULASI PELEPASAN BEBAN DENGAN UNDER FREQUENCY RELAY	49
4.1	Kombinasi Generator Lepas	49
4.2	Tahapan Frekuensi Kerja	51
4.3	Perhitungan Jumlah Beban yang Dilepas.....	57
4.4	Beban yang Dipilih Untuk Dilepas.....	63
4.5	Pengaturan Under Frequency Relay pada Perangkat Lunak ETAP	64
5.	SIMULASI DAN ANALISA.....	67
5.1	Hasil Simulasi Skenario Pelepasan Beban Dengan Rele Frekuensi	67
	KESIMPULAN	119
	DAFTAR REFERENSI	121
	DAFTAR PUSTAKA.....	122
	LAMPIRAN	123

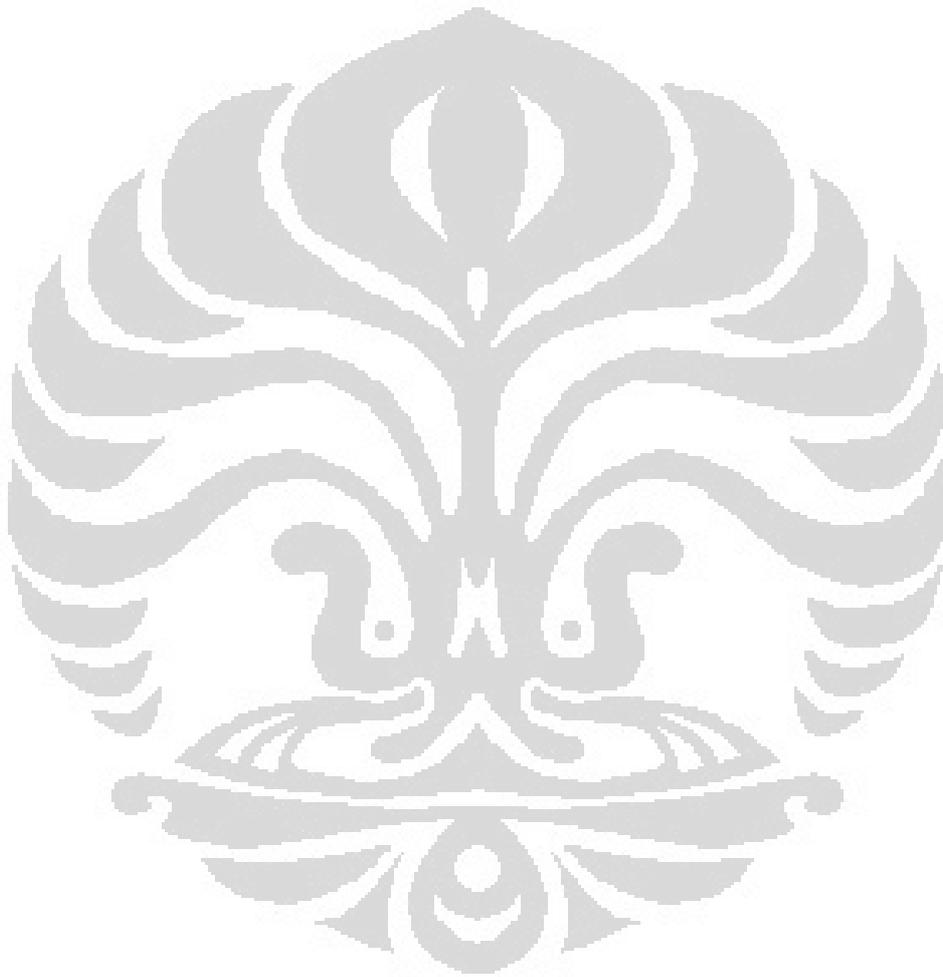
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron	7
Gambar 2.2	Skema Pembangkitan Listrik Tenaga Gas.....	9
Gambar 2.3	Grafik Penurunan Frekuensi dengan Parameter Konstanta Inersia dan Persen Overload.....	22
Gambar 2.4	IEEE Standard C37-106 2003 untuk Generator Turbin Gas	25
Gambar 3.1	Sistem Tenaga Listrik Unit Bisnis CNOOC SES Ltd.	37
Gambar 5.1	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A Lepas	68
Gambar 5.2	Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A Lepas	70
Gambar 5.3	Perubahan Daya Aktif G4, G9 , Gen 14 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A Lepas	71
Gambar 5.4	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan G4 Lepas	71
Gambar 5.5	Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan G4 Lepas	72
Gambar 5.6	Perubahan Daya Aktif G9, Gen 14 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan G4 Lepas	73
Gambar 5.7	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan G9 Lepas	74
Gambar 5.8	Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan G9 Lepas	75
Gambar 5.9	Perubahan Daya Aktif Gen 14 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan G9 Lepas.....	76
Gambar 5.10	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan Gen 14 Lepas	77
Gambar 5.11	Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan Gen 14 Lepas	77
Gambar 5.12	Perubahan Daya Aktif G4, G9 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan Gen 14 Lepas	78
Gambar 5.13	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, Gen 14 dan GEN 21 Lepas	79
Gambar 5.14	Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, Gen 14 dan Gen 21 Lepas.....	80
Gambar 5.15	Perubahan Daya Aktif G4 dan G9 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, Gen 14 dan Gen 21 Lepas.....	81
Gambar 5.16	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4 Lepas .	82
Gambar 5.17	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 Lepas	82
Gambar 5.18	Perubahan Daya Aktif Gen 14, G9 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 Lepas.....	83

Gambar 5.19	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan G9 Lepas.....	84
Gambar 5.20	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan G9 Lepas....	85
Gambar 5.21	Perubahan Daya Aktif Gen 14 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan G9 Lepas	85
Gambar 5.22	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan Gen14 Lepas	87
Gambar 5.23	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan Gen 14 Lepas	87
Gambar 5.24	Perubahan Daya Aktif G9 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan Gen 14 Lepas	88
Gambar 5.25	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4, G9 dan Gen14 Lepas.....	89
Gambar 5.26	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4, G9 dan Gen14 Lepas	89
Gambar 5.27	Perubahan Daya Aktif GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G4, G9 dan Gen14 Lepas	91
Gambar 5.28	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, G9 dan Gen 14 Lepas.....	91
Gambar 5.29	Perubahan Frekuensi Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, G9 dan Gen 14 Lepas	92
Gambar 5.30	Perubahan Daya Aktif Gen 21 Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, G9 dan Gen 14 Lepas.....	93
Gambar 5.31	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4, GEN 21 dan Gen14 Lepas.....	94
Gambar 5.32	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4, GEN 21 dan Gen14 Lepas	94
Gambar 5.33	Perubahan Daya Aktif G9 Sebelum dan Setelah Gangguan G4, GEN 21 dan Gen14 Lepas.....	95
Gambar 5.34	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, Gen14 dan GEN 21 Lepas.....	96
Gambar 5.35	Perubahan Frekuensi Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, Gen14 dan Gen 21 Lepas.....	96
Gambar 5.36	Perubahan Daya Aktif Gen 21 Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, Gen 14 dan Gen 21 Lepas	97
Gambar 5.37	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4, G9, GEN 21 dan Gen14 Lepas	98

Gambar 5.38	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4, G9, GEN 21 dan Gen14 Lepas.....	98
Gambar 5.39	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, G9, Gen14 dan GEN 21 Lepas	100
Gambar 5.40	Perubahan Frekuensi Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, Gen14 dan Gen 21 Lepas.....	100
Gambar 5.41	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan Gen14 Lepas	101
Gambar 5.42	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan Gen14 Lepas	101
Gambar 5.43	Perubahan Daya Aktif G4, G9 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan Gen14 Lepas	102
Gambar 5.44	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan Gen14 dan GEN 21 Lepas	103
Gambar 5.45	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan Gen14 dan GEN 21 Lepas	104
Gambar 5.46	Perubahan Daya Aktif G4 dan G9 Sebelum dan Setelah Gangguan Gen14 dan GEN 21 Lepas	105
Gambar 5.47	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan Gen 14 Lepas	106
Gambar 5.48	Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan Gen 14 Lepas	106
Gambar 5.49	Perubahan Daya Aktif GEN 21 dan G9 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan Gen 14 Lepas	107
Gambar 5.50	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, G9 dan Gen 14 Lepas	108
Gambar 5.51	Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, G9 dan Gen 14 Lepas.....	109
Gambar 5.52	Perubahan Daya Aktif GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan Gen 14 Lepas.....	110
Gambar 5.53	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, GEN 21 dan Gen 14 Lepas	111
Gambar 5.54	Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, GEN 21 dan Gen 14 Lepas	111
Gambar 5.55	Perubahan Daya Aktif G9 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, GEN 21 dan Gen 14 Lepas	113
Gambar 5.56	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, G9, GEN 21 dan Gen 14 Lepas.....	114

Gambar 5.57	Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, G9, GEN 21 dan Gen 14 Lepas.....	114
Gambar 5.58	Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan SFX GTG1 Lepas.....	116
Gambar 5.59	Daya aktif yang Melewati Kabel C-85.....	116
Gambar 5.60	Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan SFX GTG1 Lepas.....	117
Gambar 5.61	Perubahan Daya Aktif G4 dan G9 Sebelum dan Setelah Gangguan SFX GTG1 Lepas.....	118



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Rentang Tingkat Frekuensi Tertinggi Untuk Bekerja	28
Tabel 2.2	Rentang Pengaturan Tingkat Frekuensi Terendah Rele Bekerja.....	31
Tabel 3.1	kapasitas dan Pengaturan Generator South Business Unit	38
Tabel 3.2	Kapasitas dan Pengaturan Generator Central Business Unit	39
Tabel 3.3	Kapasitas dan Pengaturan Generator North Business Unit.....	40
Tabel 3.4	Persebaran Beban Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd.....	42
Tabel 3.5	Daya Konsumsi Beban dan Barrel Per Hari Anjungan SBU	43
Tabel 3.6	Daya Konsumsi Beban dan Barrel Per Hari Anjungan CBU.....	45
Tabel 3.7	Daya Konsumsi Beban dan Barrel Per Hari Anjungan NBU	46
Tabel 3.8	Skema Pelepasan Beban yang Diterapkan CBU	47
Tabel 3.9	Skema Pelepasan Beban yang Diterapkan NBU	48
Tabel 4.1	Kombinasi Generator Lepas.....	49
Tabel 4.2	Kapasitas dan Konstanta Inersia (H) Generator CNOOC SES Ltd....	52
Tabel 4.3	Hasil Perkiraan Frekuensi Trip dengan Menggunakan Persamaan Swing Generator.....	55
Tabel 4.4	Frekuensi Acuan Skema Pelepasan Beban Akibat Frekuensi Rendah Hasil Perhitungan dengan Persamaan Swing Generator.....	57
Tabel 4.5	Kecepatan Pemulihan Frekuensi yang Diharapkan Pada Setiap Frekuensi Trip Pemutus Tenaga.....	58
Tabel 4.6	Beban Minimal yang Harus Dilepas Untuk Memulihkan Frekuensi .	58
Tabel 4.7	Perhitungan kW/BOPD Unit Bisnis Selatan dan Unit Bisnis Tengah	60
Tabel 4.8	Perhitungan kW/BOPD Unit Bisnis Utara CNOOC SES Ltd.	61
Tabel 4.9	Daftar Platform yang Tidak boleh Dilepas	62
Tabel 4.10	Skema Pelepasan Beban Frekuensi Rendah CNOOC SES Ltd.	63
Tabel 4.11	Pengaturan Rele Frekuensi pada Bus Platform untuk Simulasi Pelepasan Beban.....	65
Tabel 4.12	Pengaturan Rele Frekuensi pada Bus Generator untuk Simulasi Pelepasan Beban.....	68
Tabel 5.1	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G101A Lepas.....	68
Tabel 5.2	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G101A, G4 Lepas	68
Tabel 5.3	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G101A, G4 dan G9 Lepas	74
Tabel 5.4	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G101A dan Gen 14 Lepas	76
Tabel 5.5	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G101A, Gen 14 dan GEN 21 Lepas.....	79
Tabel 5.6	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G4 Lepas	81
Tabel 5.7	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G4 dan G9 Lepas	84
Tabel 5.8	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G4 dan Gen14 Lepas	86
Tabel 5.9	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G4, G9 dan Gen 14 Lepas	88

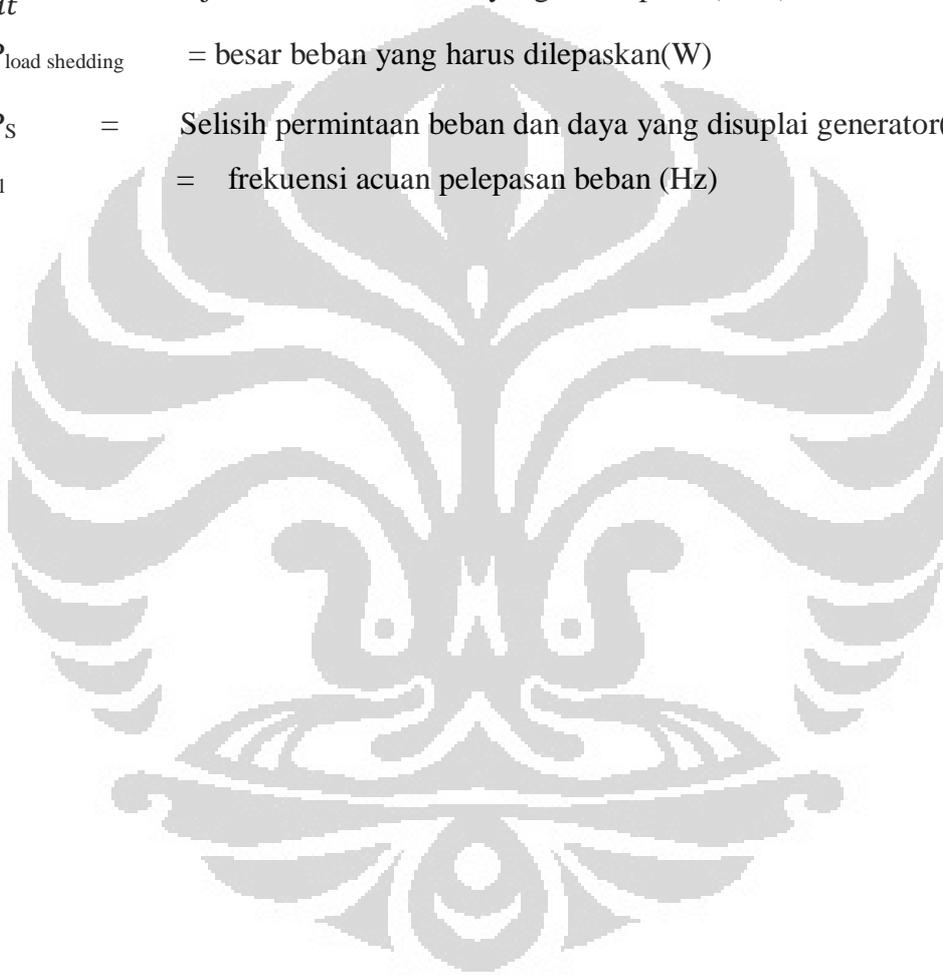
Tabel 5.10	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G4, GEN 21 dan Gen 14 Lepas.....	93
Tabel 5.11	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G4, G9, GEN 21 dan Gen 14 Lepas	97
Tabel 5.12	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika Gen 14 Lepas....	101
Tabel 5.13	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika Gen 14 dan GEN 21 Lepas	103
Tabel 5.14	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G101A, G4 dan Gen14 Lepas.....	105
Tabel 5.15	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G101A, G4, G9 dan Gen14 Lepas	108
Tabel 5.16	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G101A, G4, GEN 21 dan Gen14 Lepas	110
Tabel 5.17	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika G101A, G4, G9, GEN 21 dan Gen14 Lepas	113
Tabel 5.18	Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik Ketika SFX GTG1 Lepas	115



DAFTAR SIMBOL

B	=	kerapatan fluks (T)
μ	=	permeabilitas (Tm/A)
i	=	arus listrik (A)
l	=	panjang kawat (m)
A	=	luas penampang (m ²)
θ	=	sudut antara normal bidang dan B
N	=	jumlah lilitan
e_{ind}	=	ggl induksi (V)
n_s	=	kecepatan sinkron (rpm)
f	=	frekuensi nominal (Hz)
p	=	Jumlah kutub magnet
P	=	daya yang dibangkitkan generator (Watt)
τ	=	momen gaya / kopel mekanik generator (Nm)
θ	=	sudut rotasi (rad)
t	=	waktu (s)
T_G	=	Kopel penggerak mekanik generator (Nm)
T_B	=	Torsi Beban (Nm)
J	=	Momen Inersia penggerak mekanik generator (kg.m ²)
ω	=	Kecepatan sudut putar generator (rad/s)
t	=	waktu (s)
G	=	Rating MVA generator
H	=	Konstanta inersia generator (MJ/MVA)
δ	=	Sudut torsi generator
f_0	=	Frekuensi nominal generator (Hz)
P_A	=	Daya percepatan (W)
P_M	=	Daya mekanik generator(W)
P_E	=	Daya elektrik permintaan beban(W)
r	=	jarak partikel ke sumbu putar (m)

m	=	massa benda (kg)
$E_{k_{rot}}$	=	Energi kinetik rotasi (J)
I	=	Momen Inersia (kg.m^2)
ω	=	Kecepatan sudut putar (rpm)
f_n	=	frekuensi yang diharapkan setelah pelepasan beban (Hz)
f_0	=	frekuensi generator ketika terjadi pelepasan beban (Hz)
$\frac{df}{dt}$	=	laju kenaikan frekuensi yang diharapkan (Hz/s)
$P_{\text{load shedding}}$	=	besar beban yang harus dilepaskan(W)
P_s	=	Selisih permintaan beban dan daya yang disuplai generator(W)
f_i	=	frekuensi acuan pelepasan beban (Hz)



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Suatu sistem tenaga listrik merupakan kesatuan dari beberapa sistem yaitu sistem pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi tenaga listrik, sistem distribusi tenaga listrik serta sistem proteksi yang terdapat pada sistem-sistem tersebut. Komponen-komponen tersebut mempunyai fungsi yang saling berkaitan guna menghasilkan energi listrik yang disalurkan kepada konsumen dengan kualitas yang baik secara aman. Beberapa gangguan yang terjadi di sistem tersebut tidak akan mempengaruhi sistem yang lain apabila didukung dengan proteksi yang memenuhi syarat.

Sistem tenaga listrik yang baik adalah sistem tenaga listrik yang memiliki keandalan tinggi, bersifat ekonomis dan aman. Keandalan yang tinggi dapat ditunjukkan oleh kemampuan dari sistem tersebut mampu menghasilkan dan menyalurkan energi listrik kepada konsumen secara kontinu. Dalam penyediaan energi listrik yang kontinu maka harus didukung dengan pemakaian dan penyediaan daya listrik yang seimbang dan tentunya dengan infrastruktur yang baik. Keamanan dari sistem tenaga listrik perlu diperhatikan, baik keamanan dari sisi peralatan yang digunakan maupun keamanan dalam penyaluran energi listrik.

Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik diakibatkan oleh beberapa hal dan terjadi baik pada sistem pembangkitan, transmisi maupun distribusi. Gangguan yang besar mampu mempengaruhi kestabilan frekuensi dan tegangan sistem. Ketidakstabilan frekuensi seperti penurunan frekuensi yang drastis dapat menyebabkan sistem mengalami pemadaman total.

Untuk menjaga kualitas energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit yang kelebihan beban, maka dilakukanlah suatu pelepasan beban untuk memperbaiki frekuensi sistem. Pada skripsi ini akan dibahas mengenai penggunaan rele frekuensi dalam upaya pelepasan beban pada sistem tenaga listrik yang dimiliki oleh CNOOC SES Ltd. Penggunaan rele frekuensi diharapkan dapat mengoptimalkan penentuan prioritas beban yang dilepaskan

dengan memperhatikan kecepatan pemulihan frekuensi dengan pelepasan beban tersebut.

1.2 Tujuan

Tujuan dari skripsi ini adalah membahas suatu metode pelepasan beban akibat adanya gangguan beban lebih yang optimal dengan jumlah beban yang dilepaskan seminimum mungkin dengan diimbangi kecepatan pemulihan frekuensi yang tinggi dengan menggunakan rele frekuensi (*underfrequency relay*).

1.3 Pembatasan Masalah

Pada skripsi ini akan dibahas mengenai analisa pemilihan beban yang harus dilepaskan pada saat terjadi penurunan frekuensi akibat beban lebih dan penentuan tahapan frekuensi acuan pelepasan beban pada generator turbin gas. Pembahasan dari skripsi ini memiliki batasan-batasan antara lain:

- a. Area sistem tenaga listrik yang digunakan sebagai obyek penelitian adalah Unit Bisnis area Selatan, Unit Bisnis area Tengah dan Unit Bisnis area Utara dari CNOOC SES Ltd yang terletak di perairan Kepulauan Seribu.
- b. Jenis gangguan yang digunakan dalam simulasi pelepasan beban adalah lepasnya generator dari sistem tenaga listrik yang berakibat pada terjadinya kelebihan beban dan penurunan frekuensi.
- c. Divais yang digunakan dalam skripsi ini antara lain rele frekuensi (*under frequency relay*).
- d. Tegangan operasi yang digunakan sebagai acuan pelepasan beban adalah tegangan 13,8 kV.
- e. Frekuensi nominal sistem tenaga listrik yang menjadi obyek penelitian skripsi ini adalah 60 Hz. Rentang frekuensi kerja yang diperbolehkan dalam sistem ini sesuai IEEE C37-106 2003 adalah 59,5 – 60,5 Hz
- f. Frekuensi acuan pelepasan beban hanya melihat dari sisi generator dan tanpa melihat dari sisi beban, karena kondisi frekuensi kerja yang aman bagi generator juga merupakan rentang frekuensi kerja beban yang diijinkan untuk beban.

1.4 Metode Penelitian

Beberapa metode yang digunakan dalam menyelesaikan skripsi antara lain:

- a. Skripsi ini menggunakan data sistem tenaga listrik suatu perusahaan minyak dan gas yang disimulasikan dengan perangkat lunak ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*).
- b. Untuk dapat mengetahui variasi laju penurunan frekuensi yang mungkin terjadi dalam sistem tenaga listrik tersebut dibuat beberapa skenario kombinasi generator lepas.
- c. Perkiraan besar laju penurunan frekuensi yang terjadi dihitung dengan menggunakan persamaan *swing* generator yang membutuhkan parameter daya pembangkitan dari skenario kombinasi generator lepas, daya konsumsi beban, konstanta inersia generator dan MVA *rating* generator.
- d. Agar beban yang lepas sesuai dengan kebutuhan pemulihan frekuensi, maka frekuensi acuan perhitungan beban yang dilepas adalah frekuensi ketika pemutus tenaga benar-benar terbuka. Frekuensi ini didapatkan dengan mengalikan laju frekuensi dengan waktu kerja rele untuk mendapatkan Δf penurunan frekuensi saat terjadi gangguan.
- e. Skripsi ini menggunakan divais rele frekuensi dengan waktu tunda yang berbeda di setiap tingkat pelepasan bebannya. Hal ini untuk mengantisipasi timbulnya kesalahan kerja pada rele jika terjadi penurunan frekuensi sesaat tanpa memerlukan adanya pelepasan beban.
- f. Untuk dapat mengetahui respon frekuensi dan perubahan daya aktif yang dihasilkan generator akibat beban lebih dan pelepasan beban setelah dipasang rele frekuensi (*underfrequency relay*) ketika terjadi generator lepas, sistem tenaga listrik disimulasikan dengan perangkat lunak ETAP dengan menggunakan fitur *Transient Stability Analysis*.

1.5 Langkah-langkah Penulisan

- a. Studi literatur, yaitu dengan mencari buku-buku dan artikel yang digunakan untuk referensi yang ada di perpustakaan FTUI maupun internet.
- b. Konsultasi dengan pembimbing baik dosen maupun pembimbing di lapangan serta rekan-rekan yang berpengalaman berkaitan dengan materi skripsi.
- c. Observasi data, dalam skripsi ini dibutuhkan data-data yang akan diolah untuk membuktikan kebenaran metode pelepasan beban dengan menggunakan rele frekuensi. Data tersebut antara lain diagram saluran tunggal dari suatu sistem tenaga listrik milik salah satu perusahaan minyak dan gas di Indonesia dengan pembangkit gas beserta pengaturan komponen di dalamnya dan data BOPD (*barrel oil per day*) dari setiap anjungan perusahaan tersebut yang menjadi acuan pemilihan beban.

1.6 Sistematika Penulisan

Skripsi ini terbagi menjadi enam bab. Bab satu membahas mengenai latar belakang dari pemilihan tema skripsi ini, termasuk di dalamnya adalah tujuan akhir dari penulisan skripsi serta batasan masalah yang akan dibahas. Selain itu, metode penulisan yang digunakan penulis untuk menyusun skripsi ini dikemukakan dalam bab ini.

Dasar teori berkaitan dengan pelepasan beban akibat penurunan frekuensi akan dibahas lebih lanjut pada bab dua. Dasar teori yang digunakan antara lain prinsip kerja generator sinkron sebagai komponen utama dari suatu sistem pembangkitan listrik serta jenis mode governor yang digunakan. Selain itu, akan dibahas juga mengenai hubungan antara daya aktif yang dibangkitkan generator serta daya aktif beban dengan perubahan frekuensi sistem. Untuk menentukan batasan-batasan frekuensi dalam satu sistem tenaga listrik dengan pembangkit gas dengan frekuensi nominal 60 Hz pada bab dua ini akan disajikan standar internasional IEEE C37-106 2003. Selanjutnya untuk dapat menentukan besar beban yang dilepaskan ketika frekuensi turun hingga level tertentu diperlukan perhitungan, hal ini dilakukan agar tidak terjadi penurunan frekuensi yang

berkepanjangan atau frekuensi lebih (*over frequency*). Sehingga pada bab dua ini akan dijelaskan lebih detil mengenai hal tersebut.

Dengan mengenali sistem tenaga listrik obyek penelitian yaitu sistem tenaga listrik yang dimiliki oleh CNOOC SES Ltd dapat memudahkan penulis untuk merancang suatu skema pelepasan beban akibat penurunan frekuensi. Sehingga bab tiga dari skripsi ini akan membahas mengenai karakteristik sistem tenaga listrik tersebut. Karakteristik tersebut meliputi karakteristik seluruh generator yang digunakan dalam sistem, jenis beban yang disuplai oleh generator tersebut serta sistem transmisi dan distribusi yang ada. Selain itu, akan dibahas juga mengenai sistem pelepasan beban yang digunakan oleh sistem tenaga listrik dari perusahaan objek penelitian saat ini.

Skripsi ini akan membahas lebih lanjut mengenai perhitungan-perhitungan yang dilakukan untuk dapat menghasilkan frekuensi acuan dan besarnya beban yang dilepaskan pada saat terjadi penurunan frekuensi akibat beban lebih. Pada bab empat perhitungan tersebut disajikan dan hasilnya digunakan mengatur kerja rele frekuensi dan pemutus tenaga yang telah dikoordinasikan dengan rele frekuensi tersebut.

Hasil simulasi pelepasan beban dengan menggunakan ETAP dan analisa hasil simulasi tersebut yang kemudian akan dibandingkan dengan perancangan yang digunakan akan dibahas pada bab lima.

Bab enam skripsi ini menyimpulkan perihal tentang hasil simulasi pelepasan beban dengan menggunakan rele frekuensi. Dengan melihat hasil simulasi maka akan terlihat parameter-parameter yang sangat berpengaruh pada proses penentuan tahapan pelepasan beban akibat penurunan frekuensi dan jumlah beban yang dilepaskan yang optimal agar menghasilkan kecepatan pemulihan frekuensi yang tinggi dan tidak menimbulkan kerugian yang besar terhadap perusahaan minyak dan gas.

BAB 2

SISTEM PELEPASAN BEBAN

2.1 Sistem Pembangkitan Listrik

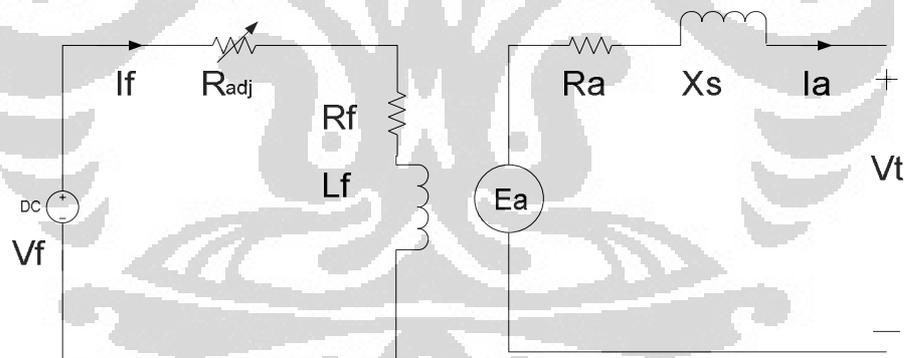
Rangkaian proses dan sistem penghasilan energi listrik hingga energi tersebut dapat dimanfaatkan bagi orang banyak secara aman disebut dengan sistem tenaga listrik. Energi listrik mula-mula dibangkitkan oleh generator yang memanfaatkan berbagai penggerak utama (*prime mover*). Dalam hal ini yang dihasilkan oleh generator adalah suatu tegangan dan arus yang nantinya akan ditransmisikan ke beban. Kemudian, tahap yang harus dilalui oleh tegangan tersebut sebelum dapat dimanfaatkan oleh konsumen adalah transmisi tenaga listrik. Komponen penting yang terdapat dalam transmisi tenaga listrik adalah transformator penaik tegangan (*step up*) dan saluran transmisi. Hal ini penting dilakukan karena pada umumnya letak pembangkit cukup jauh dari konsumen, untuk mengurangi rugi-rugi daya ketika penyaluran maka tegangan sistem dinaikkan sehingga arus transmisi kecil. Untuk dapat dimanfaatkan oleh peralatan listrik yang dimiliki oleh konsumen, tegangan dari sistem transmisi masuk ke sistem distribusi tenaga listrik. Pada sistem ini komponen yang dibutuhkan adalah transformator penurun tegangan (*step down*) dan saluran distribusi. Penurunan tegangan yang dilakukan disesuaikan dengan kebutuhan peralatan listrik. Untuk menghasilkan energi listrik yang andal dan aman bagi alat dan pemakainya, rangkaian sistem ini dilengkapi sistem proteksi.

Pada sistem pembangkitan tenaga listrik, komponen utama yang dibutuhkan adalah generator dan penggerak utama (*prime mover*). Generator merupakan suatu mesin listrik yang mampu mengubah energi kinetik menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnet. Sedangkan penggerak utama (*prime mover*) dalam hal ini membantu memutar bagian rotor generator. Penggerak utama (*prime mover*) merupakan suatu alat dalam hal ini adalah turbin yang dikopel dengan rotor generator dan bekerja dengan memanfaatkan berbagai macam sumber energi, baik tenaga air, uap, gas maupun diesel (mesin berbahan bakar minyak).

Generator yang umum digunakan oleh pembangkit listrik adalah generator sinkron. Pemilihan generator sinkron sebagai pembangkit tenaga listrik disebabkan oleh karakteristik mesinnya yang mampu menghasilkan tegangan relatif konstan. Pemberian suplai tegangan yang tidak stabil atau fluktuatif akan memberikan efek negatif kepada komponen dari peralatan listrik yang digunakan konsumen. Dengan suplai tegangan yang tidak stabil, usia pakai dari suatu peralatan listrik semakin lama akan semakin berkurang. Tentu hal ini merugikan konsumen.

2.1.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Pada generator sinkron, suatu sumber arus DC dihubungkan dengan kumparan rotor atau kumparan medan. Hal ini mampu menghasilkan suatu medan magnet rotor. Rotor tersebut kemudian diputar oleh suatu penggerak utama (*prime mover*) sehingga muncul medan magnet putar pada mesin. Medan magnet tersebut menembus stator sehingga menghasilkan fluks magnet.



Gambar 2.1 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

$$B = \frac{\mu Ni}{l} \quad (2.1)$$

$$\Phi = B A \cos \theta \quad (2.2)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = B A \frac{d \cos \theta}{dt} \quad (2.3)$$

$$e_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

Dengan B = kerapatan fluks (T)

μ = permeabilitas (Tm/A)

i = arus listrik (A)

l = panjang kawat (m)

A = luas penampang (m^2)

θ = sudut antara normal bidang dan kerapatan fluks

N = jumlah lilitan

e_{ind} = ggl induksi (V)

Ketika rotor berputar maka terjadi perubahan sudut yang dibentuk oleh normal bidang yang ditembus fluks (stator) dan kerapatan fluks setiap detiknya. Perubahan tersebut akan menghasilkan suatu ggl (gaya gerak listrik) induksi. Ggl induksi tersebut mampu menghasilkan arus apabila generator dihubungkan dengan suatu beban sehingga membentuk suatu rangkaian tertutup. Apabila beban yang dihubungkan dengan generator bersifat induktif maka arus yang dihasilkan terlambat (*lagging*) terhadap tegangan, begitu juga apabila beban yang dihubungkan bersifat kapasitif maka arus yang dihasilkan mendahului (*leading*) tegangan.

Arus-arus pada stator dapat menghasilkan medan magnet stator. Medan magnet stator menghasilkan tegangan stator. Tegangan output dari generator adalah resultan tegangan induksi dan tegangan stator. Tegangan ini merupakan tegangan AC (*alternating current*), karena terdapat 3 kumparan jangkar pada stator yang dipasang dipasang melingkar dan membentuk sudut 120° satu sama lain. Pemasangan tipe kumparan tersebut menghasilkan tegangan AC 3 fasa.

Besar kecepatan medan putar stator dan kecepatan putar rotor sama sehingga generator jenis ini disebut generator sinkron. Kecepatan ini dipengaruhi oleh frekuensi dan jumlah kutub magnet generator tersebut. Hal ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.5)$$

Dimana n_s = kecepatan sinkron (rpm)

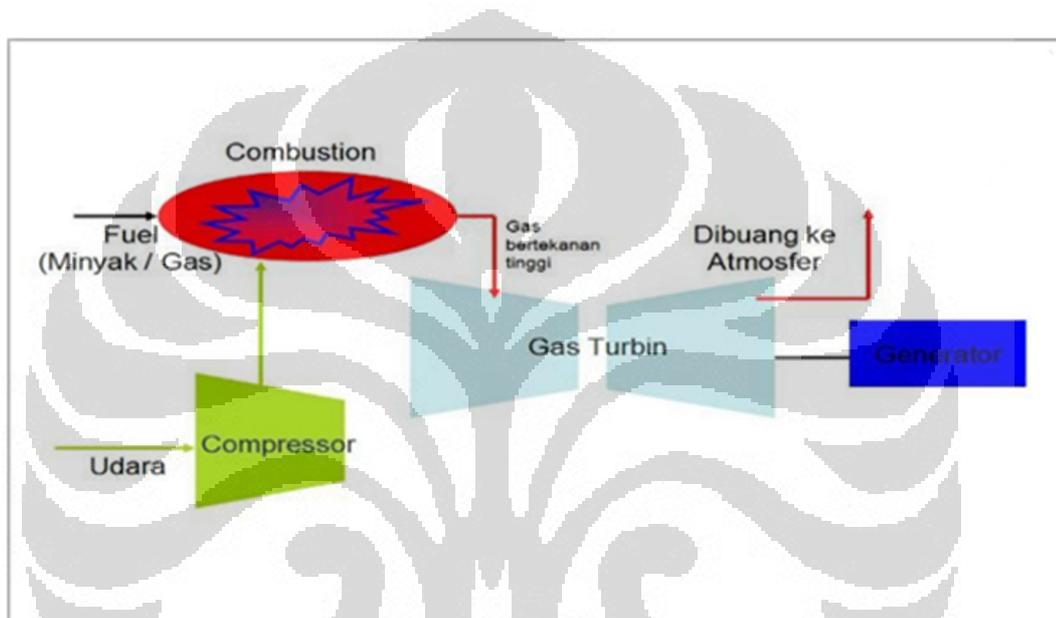
f = frekuensi (Hz)

p = Jumlah kutub magnet

2.1.2 Mekanisme Kerja PLTG

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan jenis pembangkit listrik yang dikembangkan pada saat sekarang di tengah meningkatnya harga minyak dunia. Efisiensi termal yang dimiliki turbin gas sekitar 33% dan hal tersebut sedikit lebih tinggi bila dibandingkan pembangkit dengan bahan bakar minyak yang memiliki efisiensi termal sekitar 30% (Deni Almada, 1999).

Mekanisme kerja PLTG adalah sebagai berikut :



Gambar 2.2 Skema Pembangkitan Listrik Tenaga Gas

(Sumber :Ulil Azmi, 2008)

Komponen sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) terdiri dari :

- a. Pemampat udara (*Compressor*)
- b. Ruang bakar (*Combustion Chamber*)
- c. Turbin Gas
- d. Generator sinkron

Mula-mula udara dari atmosfer dihisap melalui suatu cerobong udara (*inlet*) yang terdapat filter di dalamnya. Filter ini berfungsi untuk memisahkan debu yang dikandung oleh udara. Udara tersebut masuk ke dalam kompresor untuk dimampatkan. Penyaringan yang dilakukan di dalam inlet tersebut mampu menghindarkan kerusakan kompresor akibat debu yang menempel. Udara yang

dihisap tersebut dinaikkan tekanannya di dalam kompresor, temperaturnya pun ikut naik mencapai 500°C - 1000°C , kemudian dialirkan ke ruang bakar (*combustion chamber*). Bahan bakar, dalam hal ini adalah gas, dialirkan juga ke ruang bakar untuk dibakar dengan udara yang telah dinaikkan tekanannya. Bahan bakar dan udara tersebut dikabutkan kemudian diberi pengapian dari busi sehingga terjadi proses pembakaran. Gas hasil pembakaran yang bertekanan tinggi dapat digunakan untuk memutar turbin gas. Turbin gas dikopling dengan rotor generator sinkron, hal ini dilakukan untuk membantu sinkronisasi generator pada saat pengasutan (*starting*). Generator sinkron mampu mengubah energi kinetik (putaran turbin) menjadi energi listrik yang kemudian disalurkan ke beban. Gas hasil pembakaran yang telah digunakan untuk memutar turbin dibuang ke atmosfer.

Pengaturan putaran turbin ketika mulai bergerak hingga mencapai kondisi stabil dilakukan oleh governor. Governor merupakan suatu katup yang berfungsi mengatur banyak sedikitnya bahan bakar yang dialirkan ke ruang bakar. Mode kerja governor menurut karakteristik tanggapan governor terhadap perubahan beban yang disuplai terbagi menjadi 2, yaitu :

a. Droop

Merupakan suatu mode governor yang mengatur kecepatan turbin pada berbagai variasi beban dapat menghasilkan daya aktif keluaran generator tetap. Ketika terjadi gangguan yang mengakibatkan lepasnya beberapa beban, agar tidak terjadi pemborosan daya yang dihasilkan pengaturan kembali sistem *droop* pada generator (*power adjusting*) harus diatur oleh operator.

b. Isochronous

Merupakan suatu mode governor yang mengatur kecepatan turbin agar dapat menghasilkan daya aktif keluaran sesuai permintaan beban. Dengan begitu daya yang dihasilkan generator sesuai dengan kondisi beban. Sehingga apabila terjadi perubahan beban, maka governor akan memelihara putaran turbin agar frekuensinya tetap berada di dalam rentang yang diijinkan.

2.2 Gangguan Beban Lebih

Terjadinya beban lebih suatu sistem tenaga listrik antara lain adalah akibat adanya pembangkit yang dapat mensuplai daya yang sangat besar keluar dari sistem sehingga mengakibatkan jumlah beban yang disuplai dan besarnya daya yang dihasilkan generator tidak seimbang. Akibatnya frekuensi dari generator semakin lama akan semakin turun. Hal ini tidak boleh dibiarkan terjadi karena akan mempengaruhi kinerja generator.

2.2.1 Penanggulangan Untuk Gangguan Beban Lebih

Suatu sistem tenaga listrik hendaknya memiliki daya yang dihasilkan oleh pembangkit minimal sama dengan beban yang ditanggungnya termasuk juga rugi-rugi daya yang mungkin terjadi pada sistem tersebut. Namun, demi keamanan dan keandalan sistem, sistem pembangkit lebih baik menyiapkan cadangan daya. Ketika suatu sistem interkoneksi tenaga listrik memiliki kondisi dimana daya yang dibangkitkan tidak lagi memenuhi kebutuhan daya beban karena ada pembangkit yang keluar dari sistem, frekuensi generator yang masih bisa beroperasi semakin lama akan semakin menurun karena putaran generator semakin lambat akibat beban yang ditanggungnya semakin besar. Penurunan frekuensi yang berkelanjutan akan mengakibatkan pemadaman total pada sistem untuk menghindari kerusakan pada sistem pembangkitan. Hal-hal yang dapat dilakukan untuk mengatasi hal tersebut adalah:

- a. Mengoptimalkan kapasitas pembangkit yang masih beroperasi
Dalam hal ini adalah mengoptimalkan cadangan daya pembangkit yang masih belum dimanfaatkan ketika seluruh pembangkit beroperasi dengan normal. Cadangan daya tersebut terdiri dari 3 macam yaitu cadangan berputar (*spinning reserve*), cadangan panas, dan cadangan dingin. Pengoptimalan daya ini dilakukan oleh pengaturan governor.
- b. Pelepasan Beban (*Load Shedding*)
Ketika beban lebih terjadi pada sistem tenaga listrik yang telah mengoptimalkan seluruh kapasitas daya pembangkitnya diperlukan suatu pelepasan beban untuk memperbaiki frekuensinya. Pelepasan

beban ini dilakukan secara bertahap sesuai dengan tingkatan turunnya frekuensi.

c. Pemisahan sistem (*Islanding*)

Ketika penurunan frekuensi terjadi secara drastis dan pelepasan beban tidak mampu mengatasi hal tersebut, hal yang paling mungkin dilakukan sebelum pemadaman total adalah memisahkan sistem pembangkit dan beban yang masih mampu disuplai ke dalam kelompok-kelompok kecil (tidak interkoneksi). Hal ini bertujuan untuk menyelamatkan sistem tenaga listrik yang masih bisa beroperasi dengan normal.

2.3 Hubungan Antara Frekuensi dan Daya Aktif

Suatu generator bekerja menghasilkan suatu daya keluaran yang disalurkan ke beban. Pada umumnya daya yang dihasilkan generator besarnya sesuai dengan permintaan daya pada beban. Namun, kenyataannya daya yang dihasilkan generator lebih besar bila dibandingkan dengan permintaan daya beban karena terdapat rugi-rugi daya di sepanjang saluran transmisi dan distribusi.

Daya dalam gerak lurus dapat didefinisikan sebagai gaya yang dialami suatu benda yang bergerak pada jarak tertentu per satuan waktu. Hal ini juga berlaku bagi daya yang dihasilkan generator. Generator memiliki bagian yang berputar, sehingga tinjauan daya yang dihasilkan generator adalah daya yang dihasilkan oleh suatu benda berputar (rotasi) dan bukan merupakan benda statis. Oleh sebab itu, daya yang dihasilkan generator dapat didefinisikan sebagai momen gaya (torsi) yang dialami generator yang berputar sebesar sudut tertentu per satuan waktu.

$$P = \tau \frac{d\theta}{dt} \quad (2.6)$$

Dengan P = daya yang dibangkitkan generator (Watt)

τ = momen gaya / kopel mekanik generator (Nm)

θ = sudut rotasi (rad)

t = waktu (s)

Besarnya perubahan sudut rotasi dari bagian generator yang berputar per satuan waktu merupakan nilai dari kecepatan sudut generator tersebut.

Universitas Indonesia

$$P = \tau \omega = \tau \cdot 2\pi f \quad (2.7)$$

$$P \approx \tau \quad (2.8)$$

Dari persamaan di atas terlihat bahwa perubahan daya aktif yang dibangkitkan generator akan menyebabkan perubahan pada torsi kerja. Perubahan torsi kerja ini akan mempengaruhi frekuensi sistem. Perubahan daya aktif yang dihasilkan generator terjadi apabila permintaan daya oleh beban berubah. Hal ini tidak boleh dibiarkan terjadi karena generator memiliki rentang frekuensi kerja tertentu. Ketika generator bekerja di luar rentang frekuensi kerja, maka generator tersebut akan cepat mengalami kerusakan. Oleh sebab itu, untuk mempertahankan besarnya frekuensi sistem diperlukan pengaturan pada besarnya kopel mekanis penggerak generator.

Kopel mekanis penggerak generator berkaitan dengan besarnya bahan bakar yang digunakan untuk menggerakkan prime mover atau turbin. Pengaturan ini dilakukan oleh governor. Untuk mendapatkan frekuensi konstan, besarnya kopel mekanis penggerak generator sama dengan besarnya torsi beban. Ketika kopel mekanis penggerak generator kurang dari torsi beban maka frekuensi generator semakin lama semakin menurun. Ketika kopel mekanis penggerak generator lebih besar daripada torsi beban maka semakin lama frekuensi generator semakin meningkat. Frekuensi yang diinginkan adalah konstan di rentang yang diijinkan, untuk mendapatkan keadaan tersebut, hal ini merupakan tugas dari governor untuk mengatur banyaknya bahan bakar yang digunakan.

Hal ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$T_G - T_B = J \frac{d\omega}{dt} = J 2\pi \frac{df}{dt} \quad (2.9)$$

Dengan T_G = Kopel penggerak mekanik generator (Nm)

T_B = Torsi Beban (Nm)

J = Momen Inersia penggerak mekanik generator (kg.m^2)

ω = Kecepatan sudut putar generator (rad/s)

t = waktu (s)

Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa :

- a. Jika kopel penggerak mekanik generator lebih besar daripada torsi beban maka perubahan kecepatan sudut putar generator terhadap

waktu bernilai positif, artinya frekuensi generator semakin meningkat.

- b. Jika kopel penggerak mekanik generator bernilai sama dengan torsi beban maka perubahan kecepatan sudut putar generator terhadap waktu bernilai nol, artinya kecepatan sudut tetap setiap satuan waktu akibatnya frekuensi sistem konstan.
- c. Jika kopel penggerak mekanik generator bernilai lebih kecil daripada torsi beban maka perubahan kecepatan sudut putar generator terhadap waktu bernilai negatif, artinya kecepatan sudut putar semakin lama semakin melambat dan frekuensinya semakin turun.

2.4 Pelepasan Beban

Pelepasan beban merupakan salah satu fenomena yang terjadi di suatu sistem tenaga listrik yang mengijinkan adanya beberapa beban keluar dari sistem sehingga menghasilkan kestabilan sistem tenaga listrik. Hal ini biasanya disebabkan oleh adanya beban lebih pada sistem, sehingga untuk dapat mengembalikan kondisi sistem agar seperti sediakala diperlukan pelepasan beberapa beban tertentu. Suatu sistem tenaga listrik yang bekerja secara normal memiliki daya yang dihasilkan oleh pembangkit yang besarnya sama dengan jumlah daya permintaan beban dan rugi-rugi daya transmisi. Adanya ketidaknormalan yang disebabkan oleh terjadinya beban lebih pada umumnya dipicu oleh beberapa hal, antara lain :

- a. Ada pembangkit yang lepas dari sistem yang mengakibatkan beban yang seharusnya disuplai oleh pembangkit tersebut menjadi tanggungan pembangkit lain.
- b. Adanya gangguan pada saluran transmisi sehingga ada beberapa beban yang tidak dapat disuplai oleh salah satu pembangkit dalam sistem interkoneksi.

2.4.1 Akibat Beban Lebih pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan berupa beban lebih dapat mempengaruhi keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dan permintaan beban sehingga menyebabkan beberapa hal yang dapat mengganggu kestabilan sistem, yaitu:

- a. Penurunan tegangan sistem
- b. Penurunan frekuensi

Suatu sistem tenaga listrik beserta komponennya memiliki spesifikasi aman tertentu berkaitan dengan tegangan. Setiap komponen memiliki nilai batas bawah dan batas atas tegangan operasi sistem. Hal ini berkaitan dengan pengaruh ketidakstabilan dan kualitas tegangan yang dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan.

Sebagian besar beban pada suatu sistem tenaga listrik memiliki faktor daya tertinggal (*lagging*) sehingga membutuhkan suplai daya reaktif yang cukup tinggi. Ketika terjadi gangguan pada salah satu generator dalam sistem interkoneksi maka pada generator yang lain akan terjadi kelebihan beban. Sehingga kebutuhan daya reaktif akan semakin meningkat, bahkan lebih besar bila dibandingkan dengan yang mampu dihasilkan oleh generator dan arus yang ditarik pun semakin meningkat. Akibatnya turun tegangan yang terjadi semakin besar dan menyebabkan kondisi yang tidak aman bagi generator. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan suatu pelepasan beban. Namun, turun tegangan bisa juga diakibatkan oleh adanya gangguan lain seperti misalnya gangguan hubung singkat. Sehingga dalam hal ini penurunan frekuensi merupakan acuan yang lebih baik untuk melakukan pelepasan beban.

Pada dasarnya setiap generator memiliki spesifikasi tertentu berkaitan dengan rentang frekuensi kerja yang diijinkan beserta waktu operasi dari frekuensi tersebut. Penurunan frekuensi yang disebabkan oleh adanya beban lebih sangat membahayakan generator. Hal ini diakibatkan oleh kondisi generator yang mengalami kekurangan daya aktif sehingga daya aktif yang dihasilkan generator tidak dapat memenuhi permintaan beban. Akibatnya frekuensi yang dimiliki generator semakin lama semakin menurun. Ketika laju penurunan frekuensi menurun tajam, hal terburuk yang mungkin terjadi adalah pemadaman total.

Namun, apabila laju penurunan frekuensi tidak terlalu tajam, dapat segera dilakukan pelepasan beban.

2.4.2 Pelepasan Beban Akibat Penurunan Frekuensi

Pelepasan beban akibat penurunan frekuensi pun diklasifikasikan menjadi 2 macam berdasarkan laju penurunannya yaitu:

a. Pelepasan beban manual

Pelepasan beban manual dilakukan apabila laju penurunan frekuensi sangat rendah. Sehingga untuk memperbaiki frekuensi tidak membutuhkan waktu cepat karena sistem dirasa aman untuk jangka waktu yang cukup lama. Pelepasan beban secara manual ini akan membutuhkan beberapa operator yang cukup banyak, waktu yang dibutuhkan pun cukup lama bila dibandingkan dengan pelepasan beban otomatis.

b. Pelepasan beban otomatis

Pelepasan beban otomatis dilakukan ketika laju penurunan frekuensi cukup tinggi. Dengan adanya pelepasan beban otomatis maka sistem secara keseluruhan dapat diselamatkan dengan cepat tanpa harus menunggu operator bekerja. Pelepasan beban otomatis biasanya didukung dengan beberapa komponen, seperti misalnya penggunaan rele frekuensi.

Pelepasan beban yang dilakukan akibat penurunan frekuensi yang merupakan efek beban lebih penting dilakukan. Selain untuk menghindari terjadinya pemadaman total, pelepasan beban dapat mencegah:

a. Penuaan yang semakin cepat dari komponen mekanik generator

Penurunan frekuensi yang cukup parah menimbulkan getaran (vibrasi) yang berlebihan pada sudu turbin. Hal ini mampu memperpendek usia pakai peralatan.

b. Pertimbangan pemanasan

Berkurangnya frekuensi menyebabkan berkurangnya kecepatan putaran motor pendingin generator, berakibat berkurangnya sirkulasi udara (ventilasi) yang dapat menyebabkan pemanasan pada generator.

c. Terjadinya eksitasi lebih

Ketika terjadi penurunan frekuensi pada generator pada tegangan normal, arus eksitasi generator semakin meningkat hal ini memicu terjadinya eksitasi lebih. Eksitasi lebih ini ditandai dengan fluks berlebih yang dapat menyebabkan munculnya arus pusar. Arus pusar tersebut dapat menyebabkan pemanasan pada inti generator.

2.4.3 Syarat Pelepasan Beban

Sebelum dilakukan suatu pelepasan beban yang bertujuan untuk pemulihan frekuensi, hendaknya pelepasan beban ini memenuhi beberapa kriteria antara lain:

- a. Pelepasan beban dilakukan secara bertahap dengan tujuan apabila pada pelepasan tahap pertama frekuensi belum juga pulih masih dapat dilakukan pelepasan beban tahap berikutnya untuk memperbaiki frekuensi.
- b. Jumlah beban yang dilepaskan hendaknya seminimal mungkin sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik dalam memperbaiki frekuensi.
- c. Beban yang dilepaskan adalah beban yang memiliki prioritas paling rendah dibandingkan beban lain dalam suatu sistem tenaga listrik. Oleh sebab itu seluruh beban terlebih dahulu diklasifikasikan menurut kriteria-kriteria tertentu.
- d. Pelepasan beban harus dilakukan tepat guna. Oleh karenanya harus ditentukan waktu tunda minimum rele untuk mendeteksi apakah penurunan frekuensi generator akibat beban lebih atau pengaruh lain seperti misalnya masuknya beban yang sangat besar ke dalam sistem secara tiba-tiba.

Keempat kriteria tersebut harus terpenuhi, dengan begitu pelepasan beban aman untuk dilakukan.

2.5 Penurunan Frekuensi Akibat Beban Lebih

Suatu generator akan berputar dengan frekuensi yang semakin menurun apabila kopel penggerak mekanik generator besarnya kurang dari torsi beban. Ketika terdapat generator pembangkit lain yang berada dalam suatu interkoneksi

lepas atau keluar dari sistem, secara otomatis beban yang ditanggung pembangkit yang lepas akan menjadi tanggungan generator yang masih bekerja dalam sistem. Dengan demikian torsi beban pada generator yang masih mampu bekerja akan bertambah. Peningkatan torsi beban pada generator ini akan diimbangi dengan peningkatan kopel mekanik penggerak generator dengan melakukan pengaturan pada governor untuk mempertahankan frekuensi kerja sistem tetap konstan. Namun, ada saat ketika governor telah dibuka secara maksimal untuk mengalirkan sumber energi penggerak turbin, kopel penggerak mekanik generator besarnya masih kurang dari torsi beban. Hal inilah yang menjadikan frekuensi generator menjadi turun. Untuk mengatasi hal tersebut tentu diperlukan suatu pengurangan torsi beban dengan beberapa cara di antaranya adalah pelepasan beban.

2.5.1 Laju Penurunan Frekuensi

Penurunan frekuensi suatu generator dapat disebabkan oleh lepasnya salah satu pembangkit yang berkapasitas besar dari sistem tenaga listrik maupun gangguan hubung singkat. Terjadinya gangguan hubung singkat mengakibatkan penurunan frekuensi dalam waktu singkat, setelah itu frekuensi dapat pulih dengan sendirinya dengan bantuan pengaturan governor. Sedangkan penurunan frekuensi akibat beban lebih yang sangat besar diperlukan suatu pelepasan beban untuk memulihkan frekuensi.

Besarnya laju penurunan frekuensi sangat berpengaruh terhadap beberapa hal, antara lain:

a. **Jenis Pelepasan Beban yang Dilakukan**

Ketika tingkat laju penurunan frekuensi yang terjadi rendah maka pelepasan beban dilakukan secara manual oleh operator. Namun, bila tingkat laju penurunan frekuensi tinggi maka diperlukan pelepasan beban secara otomatis.

b. **Waktu Tunda Rele**

Laju penurunan frekuensi mempengaruhi pengaturan waktu tunda rele. Untuk laju penurunan frekuensi yang tinggi tentu diatur agar waktu tunda yang dimiliki rele sesingkat mungkin. Semakin lama waktu tunda rele, tentu penurunan frekuensi yang terjadi semakin besar

c. Jumlah Beban yang Dilepas

Penurunan frekuensi yang besar harus diimbangi dengan pelepasan beban yang besar, hal ini bertujuan agar mempercepat pemulihan frekuensi. Sedangkan ketika laju penurunan frekuensi rendah, dimungkinkan untuk melakukan pelepasan beban dalam jumlah besar namun bertahap. Hal ini bertujuan untuk meminimalisasi jumlah beban yang dilepaskan.

Demikian berpengaruhnya besar laju penurunan frekuensi terhadap pelepasan beban, maka perlu diketahui faktor-faktor yang mempengaruhi besar laju penurunan frekuensi. Faktor-faktor tersebut antara lain:

- a. Konstanta inersia
- b. Daya mekanik generator
- c. Daya elektrik yang dibutuhkan beban

Faktor-faktor tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan laju penurunan frekuensi. Dengan perkiraan tersebut, dapat juga ditentukan besar frekuensi akhir sesaat sebelum pemutus tenaga terbuka. Selanjutnya, jumlah beban yang harus dilepaskan untuk pemulihan frekuensi pun dapat ditentukan.

Hubungan yang mendefinisikan perubahan frekuensi terhadap waktu, dalam hal ini disebut dengan laju perubahan frekuensi berdasarkan perubahan besarnya daya yang dihasilkan generator dan daya yang dibutuhkan beban dapat digambarkan oleh persamaan swing suatu generator sederhana (Juan M. Gers and Edward J. Holmes, 2004) sebagai berikut:

$$\frac{GH}{\pi f_0} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_A \quad (2.10)$$

Dengan G = Rating MVA generator

H = Konstanta inersia generator (MJ/MVA)

δ = Sudut torsi generator

f_0 = Frekuensi nominal generator (Hz)

P_A = Daya percepatan (MW)

Kecepatan putaran generator dapat dinyatakan sebagai :

$$\omega = \omega_0 + \frac{d\delta}{dt} = 2\pi f \quad (2.11)$$

Universitas Indonesia

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = 2\pi \frac{df}{dt} \quad (2.12)$$

Dengan ω_0 = Kecepatan generator saat frekuensi nominal (rpm)

Dari persamaan (2.10) dan (2.12) dapat disimpulkan bahwa:

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_A f_0}{2GH} \quad (2.13)$$

Dengan $P_A = P_M - P_E$

P_A = Daya percepatan

P_M = Daya mekanik generator

P_E = Daya elektrik permintaan beban

Sesuai dengan persamaan (2.13) terbukti bahwa besarnya laju penurunan frekuensi dipengaruhi oleh 3 faktor yang telah disebutkan sebelumnya.

2.5.2 Pengaruh Konstanta Inersia Terhadap Penurunan Frekuensi

Setiap benda memiliki kemampuan untuk mempertahankan diri dari gangguan yang diberikan kepadanya. Untuk benda yang bergerak secara mendatar (translasi), besarnya kemampuan untuk mempertahankan diri tersebut dipengaruhi oleh massa. Sedangkan untuk benda berotasi kemampuan atau kecenderungan untuk mempertahankan diri tidak hanya bergantung pada massa tetapi juga kepada momen inersia. Suatu benda yang memiliki momen inersia semakin besar artinya memiliki kemampuan yang semakin tinggi untuk mempertahankan diri. Generator merupakan benda berotasi sehingga memiliki nilai momen inersia.

$$I = \int r^2 dm \quad (2.14)$$

Dengan I = momen inersia

r = jarak partikel ke sumbu putar

m = massa benda

Suatu benda yang bergerak menghasilkan energi kinetik. Energi tersebut bergantung pada massa dan kecepatan bergerak benda. Sebagai benda bergerak rotasi, energi kinetik generator dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Ek_{rot} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.15)$$

Dengan Ek_{rot} = Energi kinetik rotasi

I = Momen Inersia

ω = Kecepatan sudut putar

Sedangkan energi yang dihasilkan pada kecepatan sinkron per volt-ampere dari rating generator disebut dengan konstanta inersia. Selanjutnya energi kinetik generator dapat dinyatakan sebagai :

$$GH = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.16)$$

Dengan G = Rating MVA generator

H = Konstanta inersia

I = momen inersia

ω = kecepatan sudut putar

Ketika suatu generator menerima tambahan beban akibat adanya gangguan pada sistem transmisi maupun generator lain yang lepas dari sistem, kestabilan dari generator tersebut akan terganggu. Beban lebih yang diterima oleh generator secara tidak langsung merupakan gangguan bagi generator. Tanggapan dari gangguan tersebut adalah terjadinya penurunan frekuensi. Besarnya tanggapan ini bergantung pada kemampuan generator untuk mempertahankan diri dari gangguan. Semakin besar momen inersia suatu generator maka semakin besar pula nilai konstanta inersia generator tersebut untuk frekuensi kerja dan rating MVA yang sama. Tingginya nilai momen inersia suatu benda dapat memberikan ketahanan yang lebih tinggi menanggapi terjadinya gangguan.

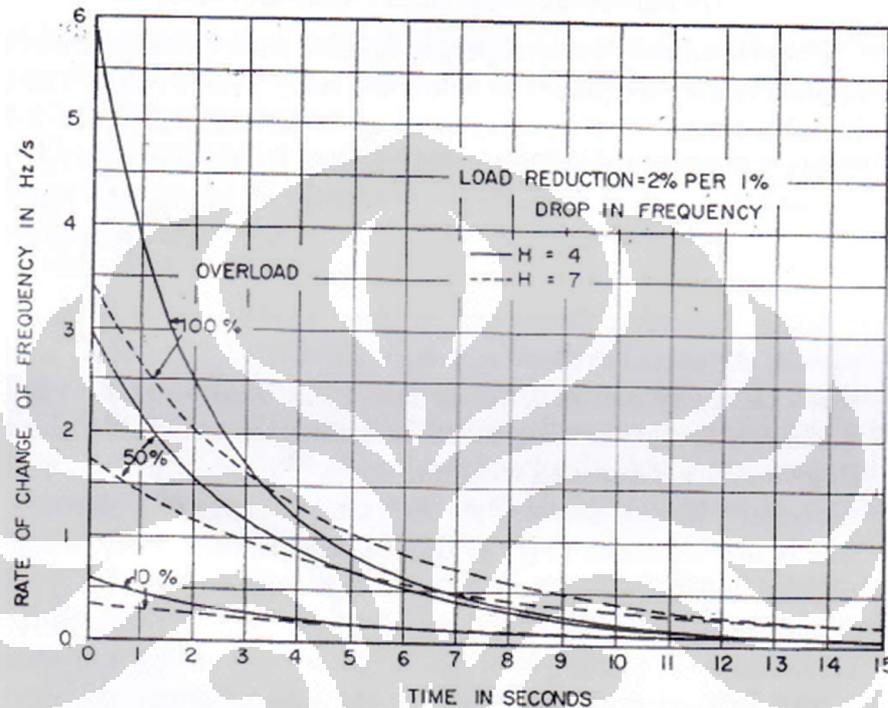
Salah satu faktor yang mempengaruhi besar laju penurunan frekuensi suatu generator adalah konstanta inersia. Semakin besar nilai konstanta inersia maka kemampuan suatu generator dalam mempertahankan diri dalam menghadapi gangguan dalam hal ini adalah respon frekuensi terhadap kelebihan beban semakin tinggi.

Sesuai dengan persamaan (2.13) ketika nilai konstanta inersia suatu generator semakin tinggi maka laju penurunan frekuensi semakin rendah. Nilai konstanta inersia yang digunakan dalam persamaan tersebut mampu menggambarkan nilai konstanta inersia sebuah generator maupun kumpulan beberapa generator. Nilai konstanta inersia dari kumpulan beberapa generator merupakan nilai rata-rata dari konstanta inersia keseluruhan generator, atau dapat dinyatakan sebagai berikut (Juan M. Gers and Edward J. Holmes, 2004):

Universitas Indonesia

$$H = \frac{H_1 MVA_1 + H_2 MVA_2 + \dots + H_n MVA_n}{MVA_1 + MVA_2 + \dots + MVA_n} \quad (2.17)$$

Dengan notasi 1, 2,..., n merupakan notasi urutan generator.



Gambar 2.3 Grafik Penurunan Frekuensi dengan Parameter Konstanta Inersia dan Persen Overload

(Sumber : Lokay)

Gambar 2.3 menggambarkan pengaruh nilai konstanta inersia terhadap besarnya perubahan frekuensi terhadap waktu. Untuk besar nilai kelebihan beban yang sama laju perubahan frekuensi pada generator yang memiliki konstanta inersia lebih besar akan menjadi lebih rendah daripada generator yang memiliki konstanta inersia yang lebih rendah. Pada gambar terlihat bahwa pada prosentase kelebihan beban 100%, generator yang memiliki konstanta inersia (H) 7 MJ/MVA mengalami laju penurunan frekuensi sekitar 3.5 Hz/s, sedangkan untuk generator yang memiliki konstanta inersia (H) 4 MJ/MVA laju penurunan frekuensi yang dialaminya hingga 6 Hz/s.

2.5.3 Pengaruh Kelebihan Beban

Ketidakseimbangan antara daya yang dihasilkan oleh pembangkit dan kebutuhan daya beban berakibat pada terjadinya penyimpangan frekuensi. Ketika daya yang dihasilkan generator lebih besar dibandingkan kebutuhan daya beban maka frekuensi generator semakin lama akan semakin meningkat. Sebaliknya, bila daya yang dihasilkan oleh generator lebih kecil dibandingkan dengan kebutuhan daya beban maka frekuensi semakin lama akan semakin menurun.

Dari persamaan (2.7) dapat disimpulkan bahwa

$$P \approx \tau$$

Dimana P adalah daya dan τ adalah torsi.

Dalam kasus kelebihan beban dikenal istilah daya percepatan (P_A), daya mekanik generator (P_M) dan daya elektrik beban (P_E). Hubungan ketiganya digambarkan sebagai berikut:

$$P_A = P_M - P_E \quad (2.18)$$

Dengan mengingat hubungan antara daya dan torsi dari persamaan (2.7) maka dapat disimpulkan bahwa :

$$T_A = T_M - T_E \quad (2.19)$$

T_A merupakan torsi percepatan, T_M adalah torsi mekanik yang dimiliki oleh generator dan T_E adalah torsi elektrik beban. Torsi merupakan gaya yang dialami oleh benda berotasi, maka persamaan (2.19) dapat dinyatakan sebagai:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_M - T_E \quad (2.20)$$

$$J 2\pi \frac{df}{dt} = T_M - T_E \quad (2.21)$$

Maka, ketika $P_M > P_E$, $T_M > T_E$ nilai perubahan frekuensi terhadap waktu akan bernilai positif dan kelebihan daya ada pada sisi pembangkit. Sebaliknya, jika $P_M < P_E$, $T_M < T_E$ nilai perubahan frekuensi terhadap waktu akan bernilai negatif dan kelebihan daya berada pada sisi beban, hal inilah yang menyebabkan turunnya frekuensi generator.

Besar kelebihan beban biasanya dinyatakan dalam prosentase (H. E. Lokay, 1968):

$$\text{Prosentase Kelebihan Beban} = \frac{\text{Beban} - \text{Suplai Generator}}{\text{Suplai Generator}} \times 100\% \quad (2.22)$$

$$\text{Prosentase Kelebihan Beban} = \frac{\text{Kekurangan Pembangkitan}}{\text{Pembangkitan Tersisa}} \times 100\% \quad (2.23)$$

Dari gambar 2.3 dapat dilihat pengaruh besar prosentase kelebihan beban suatu sistem terhadap besar laju penurunan frekuensi. Pada grafik tersebut laju penurunan frekuensi generator dengan konstanta inersia 4 MJ/MVA misal prosentase beban lebih mencapai 10% maka besar laju penurunan frekuensi sekitar 1 Hz/s. Namun, ketika prosentase beban lebih mencapai 100%, laju penurunan frekuensi mencapai 6 Hz/s. Terlihat bahwa semakin kecil tingkat kelebihan beban maka semakin kecil laju penurunan frekuensi.

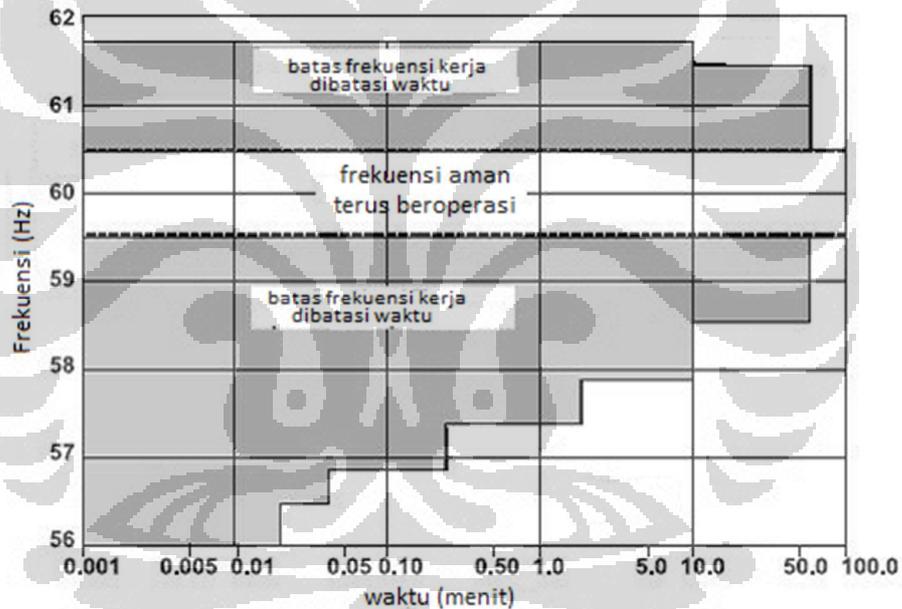
2.6 Standar Frekuensi Kerja Generator Turbin Gas

Suatu peralatan listrik memiliki batas-batas operasi tertentu berkaitan dengan parameter kerja masing-masing peralatan. Hal ini bertujuan agar unjuk kerja yang dihasilkan peralatan tetap terjaga dengan baik dan umur penggunaan peralatan bisa lebih lama. Begitu juga dengan generator, agar unjuk kerja generator dan masa penggunaannya sesuai dengan yang dianjurkan pabrik maka generator memiliki batas-batas operasi berkaitan dengan parameter frekuensi kerja.

Masing-masing sistem pembangkit memiliki beberapa komponen penting yang harus dimiliki, yaitu generator, turbin dan motor-motor pendukung kinerja generator dan turbin. Setiap pembangkit memiliki karakteristik turbin yang berbeda bergantung kepada jenis sumber energi yang dimanfaatkan oleh pembangkit tersebut. Seperti misalnya PLTG menggunakan turbin gas, PLTA menggunakan turbin hidro. Perbedaan ini meliputi bentuk fisik serta karakteristik operasional turbin.

2.6.1 IEEE Standard C37-106 2003

Generator turbin gas memiliki karakteristik frekuensi tertentu, baik frekuensi kerja 50 Hz atau 60 Hz. Karakteristik frekuensi kerja generator turbin gas 60 Hz dan waktu operasi yang diijinkan telah diatur dalam beberapa standar, antara lain IEEE Standard C37-106 2003. IEEE Standard C37-106 2003 memuat panduan standar-standar frekuensi abnormal yang dapat digunakan sebagai pedoman pemasangan sistem proteksi dalam hal ini rele frekuensi. Dalam standar ini dijelaskan juga beberapa standar frekuensi abnormal dan waktu operasi yang diijinkan untuk beberapa macam pembangkit. Standar frekuensi kerja abnormal generator turbin gas dan waktu operasi yang diijinkan digambarkan di grafik berikut :



Gambar 2.4 IEEE Standard C37-106 2003 untuk generator turbin gas

(Sumber : IEEE, 2003)

Sesuai dengan standar IEEE, frekuensi kerja yang diijinkan adalah 60 ± 0.5 Hz. Ketika generator bekerja pada rentang frekuensi tersebut maka generator boleh bekerja secara kontinyu. Namun, ketika generator bekerja di luar rentang frekuensi kerja tersebut maka terdapat batas waktu operasi yang diijinkan.

2.7 Pengaturan *Under Frequency Relay*

Pada pelepasan beban yang diakibatkan oleh penurunan frekuensi dibutuhkan suatu *under frequency relay* yang dapat mendeteksi ketidaknormalan tersebut. Sinyal ketidaknormalan tersebut selanjutnya disampaikan ke pemutus tenaga yang terpasang di beban yang ingin dilepaskan. Agar memberikan performa maksimal terhadap sistem, perlu dilakukan beberapa pengaturan terhadap *under frequency relay*. Beberapa parameter yang harus diatur terlebih dahulu antara lain:

- a. Frekuensi kerja rele
- b. Waktu operasi rele
- c. Koordinasi dengan pemutus tenaga

Apabila terjadi pelepasan beban diharapkan tidak terjadi kelebihan beban yang dilepaskan karena hal ini mengakibatkan kerugian bagi pembangkit maupun pengguna. Oleh sebab itu, diperlukan beberapa tahapan pelepasan beban untuk menghindari hal tersebut. Tahap-tahap tersebut diatur pada *under frequency relay*. Tahapan frekuensi tersebut dapat diperkirakan dengan melalui beberapa perhitungan.

Dalam menanggapi sinyal frekuensi rendah, rele membutuhkan waktu tunda untuk memastikan apakah penurunan tersebut disebabkan oleh beban lebih atau penyebab yang lain. Setelah dipastikan bahwa penurunan tersebut disebabkan oleh beban lebih, rele juga membutuhkan waktu untuk beroperasi. Pada umumnya, masing-masing rele frekuensi memiliki karakteristik waktu operasi tertentu yang dipengaruhi oleh laju penurunan frekuensi. Sehingga untuk mendapatkan hasil yang optimal, pengaturan waktu tunda dapat disesuaikan dengan karakteristik rele.

Rele frekuensi berfungsi untuk memberikan sinyal kepada pemutus tenaga beban untuk membuka. Ketika pemutus tenaga bekerja maka jaringan beban yang terhubung dengannya lepas dari sistem. Oleh karena pemilihan beban yang akan dilepaskan berdasarkan prioritas nilai ekonomi dan keandalan sistem, beban yang akan dilepaskan terletak menyebar di seluruh sistem. Untuk mengatasi hal tersebut tentu perlu pertimbangan khusus untuk memilih letak pemasangan rele frekuensi.

2.7.1 Perkiraan Tahapan Frekuensi Acuan

Frekuensi kerja optimal suatu generator telah ditetapkan oleh beberapa standar yang telah dibahas sebelumnya. Rentang frekuensi tersebut dibuat untuk menghindari terjadinya gangguan atau ketidaknormalan kerja pada generator akibat *under frequency* atau *over frequency*. Ketika frekuensi berada pada rentang tersebut, generator mampu bekerja secara kontinyu (tanpa batas waktu), namun ketika terjadi gangguan sehingga frekuensi generator melampaui atau kurang dari frekuensi yang seharusnya durasi kerja generator menjadi terbatas untuk menghindari terjadinya kerusakan. Diharapkan selama durasi waktu yang diijinkan tersebut frekuensi generator dapat pulih dengan pengaturan torsi mekanik yang dilakukan oleh governor. Namun, jika selama waktu yang masih diijinkan tersebut frekuensi kerja generator belum pulih atau bahkan semakin menurun dibutuhkan suatu acuan frekuensi minimal untuk mengoperasikan rele frekuensi agar dapat melakukan pelepasan beban sesaat kemudian. Dengan dilakukan pelepasan beban, diharapkan frekuensi kerja generator lebih cepat pulih dan tidak membahayakan sistem.

Tingkat frekuensi acuan pengoperasian *under frequency relay* dapat diperkirakan berdasarkan besar kelebihan yang terjadi. Ketika generator telah memasuki titik frekuensi abnormal akibat beban lebih hendaknya sesegera mungkin dilakukan pelepasan beban. Suatu pelepasan beban yang baik adalah pelepasan sejumlah beban yang tepat, tepat dari segi waktu pemulihan maupun jumlah yang dilepas. Untuk menghindari kelebihan beban yang dilepas maka pelepasan beban dilakukan secara bertahap sesuai dengan kebutuhan frekuensi.

2.7.1.1 Penentuan Frekuensi Acuan Tahap Pertama

Mulai bekerjanya suatu *under frequency relay* adalah ketika frekuensi generator memasuki wilayah abnormal. Untuk mendapatkan keandalan yang tinggi dari sistem tersebut maka harus dipilih tingkat frekuensi tertinggi untuk rele trip. Nilai frekuensi tersebut tidak boleh terlalu jauh dengan batas bawah frekuensi nominal.

Pemilihan tingkat frekuensi pertama kali bekerja mutlak ditentukan oleh pengguna. Tentu saja pemilihan frekuensi tertinggi ini melalui pertimbangan-pertimbangan khusus seperti misalnya keamanan sistem yang diberikan, kapasitas generator serta kemampuan sistem untuk bertahan pada frekuensi tersebut.

Menurut beberapa survey yang dilakukan oleh *Power System Relaying Committee* (PSRC), salah satu dari 18 komite teknis IEEE *Power Engineering Society* (PES) yang bekerja untuk memberikan bimbingan atau penyuluhan berkaitan dengan teknologi proteksi pada sistem tenaga listrik, didapatkan beberapa nilai frekuensi tertinggi untuk acuan bagi rele trip yang dipilih oleh beberapa perusahaan seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Rentang Tingkat Frekuensi Tertinggi Untuk Bekerja

Frekuensi (Hz)	Jumlah Perusahaan Menurut Kapasitas Generator (MW)			Total
	0-1000	1001-3000	3001-4000	
59.6 – 60	2	2	0	4
59.1 – 59.5	28	13	9	50
58.6 – 59.0	9	11	4	24
58.1 – 58.5	5	2	0	7
57.0 – 58.0	1	1	0	2

Dari tabel 2.1 terlihat bahwa frekuensi tertinggi untuk rele bekerja berada pada rentang 59.1 – 59.5 Hz. Rentang frekuensi ini berada 0.5 – 0.9 Hz di bawah frekuensi nominal 60 Hz. Dari survei didapatkan pula titik frekuensi yang paling banyak digunakan sebagai frekuensi tertinggi rele bekerja adalah 59.3 Hz. Nilai ini dirasa tidak terlalu rendah maupun terlalu tinggi untuk dijadikan patokan awal.

2.7.1.2 Penentuan Frekuensi Acuan Tahap Kedua dan Seterusnya

Setelah frekuensi tertinggi untuk rele bekerja ditentukan, ketika terjadi beban lebih pada sistem dan frekuensi pun turun akibat ketidakmampuan governor untuk menyediakan torsi mekanik tambahan untuk melayani kebutuhan beban maka ketika frekuensi memasuki daerah frekuensi trip akan terjadi pelepasan beban untuk pemulihan frekuensi. Beban yang dilepaskan ini diasumsikan telah ditentukan sebelumnya. Ada saat di mana jumlah beban yang dilepaskan belum

cukup untuk memulihkan frekuensi sehingga frekuensi masih terus menurun. Oleh sebab itu diperlukan beberapa tingkatan frekuensi yang diatur pada rele frekuensi yang besarnya lebih rendah daripada frekuensi acuan pertama untuk melepaskan beban yang lebih besar lagi. Hal ini dilakukan untuk menghindari adanya kekurangan beban yang dilepas pada tahap pertama.

Penentuan frekuensi acuan tahap kedua dan seterusnya bergantung pada besarnya perkiraan laju penurunan frekuensi yang terjadi dan waktu operasi rele pada tahap sebelumnya.

a. Laju penurunan frekuensi berdasarkan kelebihan beban yang terjadi

Langkah pertama untuk menentukan frekuensi acuan adalah menghitung besar laju penurunan frekuensi. Laju penurunan ini bergantung pada besarnya kelebihan beban yang terjadi, frekuensi nominal, rating MVA generator dalam keadaan ideal dan besar konstanta inersia.

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{P_s}{2GH} \right) \times f \quad (2.24)$$

Dengan P_s = Selisih permintaan beban dan daya yang disuplai generator

G = Rating MVA generator

H = Konstanta Inersia

f = Frekuensi nominal

b. Waktu Bekerjanya Rele

Lamanya waktu trip dipengaruhi oleh 3 faktor yaitu (Juan M. Gers and Edward J. Holmes, 2004):

➤ Waktu Pick-up

Merupakan waktu yang dibutuhkan rele untuk mulai bekerja setelah terjadi penurunan frekuensi.

Misal : frekuensi nominal 60 Hz, frekuensi rele trip yang pertama adalah 59 Hz. Sehingga waktu pick-up adalah waktu yang dihitung sesaat sebelum frekuensi turun yaitu ketika 60 Hz hingga frekuensi memasuki tahap trip yang pertama.

➤ Waktu Rele

Merupakan waktu yang dibutuhkan rele untuk menghantarkan sinyal ke pemutus tenaga dan dihitung sejak terdeteksinya sinyal frekuensi trip hingga sinyal tersebut sampai di pemutus tenaga.

Universitas Indonesia

➤ Waktu Pemutus tenaga

Merupakan waktu yang dibutuhkan pemutus tenaga untuk menerima sinyal dari rele hingga pemutus tenaga terbuka dan beban yang dihubungkan ke jaringan oleh pemutus tenaga terlepas.

Penghitungan waktu ini digunakan untuk menentukan perkiraan frekuensi akhir dimana saat pelepasan beban dilakukan setelah frekuensi tertinggi untuk trip terdeteksi.

$$t_{trip} = t_{pick-up} + t_{CB} + t_{relay} \quad (2.25)$$

$$t_{pick-up} = \frac{f_0 - f_1}{\frac{df}{dt}} \quad (2.26)$$

Dengan f_1 adalah frekuensi acuan pelepasan beban.

Setelah laju penurunan frekuensi dan waktu trip tahap sebelumnya didapatkan, nilai frekuensi ketika terjadi pelepasan beban adalah :

$$f_{load shedding} = \left[f_0 - \frac{df}{dt}(t_{trip}) \right] \quad (2.27)$$

Kemudian untuk frekuensi trip tahap berikutnya harus bernilai sedikit lebih kecil daripada frekuensi saat pelepasan beban dari frekuensi trip tahap sebelumnya.

2.7.1.3 Pengaturan Frekuensi Minimum

Pengaturan frekuensi yang dilakukan pada *under frequency relay* juga harus memperhatikan kestabilan sistem. Oleh sebab itu, frekuensi acuan rele untuk trip paling rendah perlu dipertimbangkan dalam pemilihannya sehingga tidak menyebabkan ketidakstabilan pada sistem yang pada akhirnya dapat merusak kerja generator. Pemilihan tersebut berdasarkan rentang frekuensi kerja generator yang diijinkan.

Penentuan tahap akhir pengaturan tingkat frekuensi trip dari suatu rele disesuaikan dengan keinginan pengguna dengan mempertimbangkan keamanan sistem. Beberapa survey dilakukan oleh *Power System Relaying Committee* untuk mengetahui tahapan frekuensi terendah yang diatur pada rele pada beberapa perusahaan. Dari hasil survey tersebut, didapatkan rentang frekuensi yang diperlihatkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Rentang Pengaturan Tingkat Frekuensi Terendah Rele Bekerja

Frekuensi (Hz)	Jumlah Perusahaan Menurut Kapasitas Generator (MW)			
	0-1000	1001-3000	3001-4000	Total
58 - 59	26	11	8	45
57 - 58	10	11	1	22
56 - 57	4	3	2	9
55 - 56	2	2	2	6

Dari tabel 2.2 didapatkan rentang frekuensi terendah yang diatur pada rele paling banyak digunakan adalah rentang frekuensi 58 – 59 Hz. Dengan melihat data tersebut, terlihat bahwa beberapa perusahaan yang menggunakan *under frequency relay* sangat memperhatikan tingkat kestabilan sistem. Pemilihan rentang frekuensi ini mengacu kepada standar frekuensi IEEE. Dimana pada frekuensi tersebut, generator masih diijinkan bekerja pada durasi waktu yang cukup lama.

2.7.2 Koordinasi *Under Frequency Relay* dan Pemutus Tenaga

Dalam proses pelepasan beban akibat penurunan frekuensi dibutuhkan suatu *under frequency relay*. Rele tersebut berfungsi untuk mengirimkan sinyal penurunan frekuensi ke pemutus tenaga yang terletak pada sisi beban. Banyaknya rele yang dibutuhkan serta peletakan rele untuk melakukan suatu pelepasan beban bergantung kepada tingkat prioritas beban yang ingin dilepaskan apabila terjadi gangguan.

Rele frekuensi ketika bekerja hanya akan mengirimkan sinyal penurunan frekuensi kepada pemutus tenaga yang menghubungkan beban paling rendah tingkat prioritasnya baik dipandang dari segi ekonomi, keandalan sistem maupun daya yang dibutuhkan.

2.7.3 Pengaturan Waktu Tunda

Secara umum, penurunan frekuensi pada suatu sistem tenaga listrik dapat disebabkan oleh beberapa hal, antara lain adanya penambahan beban yang signifikan pada sistem, lepasnya suatu pembangkit dengan kapasitas yang besar,

dan gangguan hubung singkat. Oleh sebab itu, *under frequency relay* harus mampu membedakan penyebab penurunan frekuensi agar tidak terjadi kesalahan kerja pada rele. Ketika penurunan frekuensi disebabkan oleh gangguan hubung singkat durasi penurunan frekuensi ini hanya sesaat dan dengan bantuan pengaturan governor frekuensi akan pulih dengan sendirinya, tentu tidak dibutuhkan suatu pelepasan beban untuk memulihkan frekuensi. Sedangkan ketika penurunan frekuensi disebabkan oleh suatu beban lebih di mana governor telah mengoptimalkan sisa cadangan generator, semakin lama nilai frekuensi generator akan semakin turun karena tidak mampu memulihkan frekuensinya sendiri. Apabila tidak dilakukan pelepasan beban, frekuensi generator akan mencapai titik nol. Oleh sebab itu, diperlukan waktu tunda bagi rele untuk mendefinisikan penyebab turunnya frekuensi.

2.8 Prioritas Beban

Dalam suatu sistem tenaga listrik terdapat berbagai macam beban. Beban tersebut dapat berupa motor-motor induksi yang dimanfaatkan di lingkungan industri maupun lampu penerangan di bangunan dan jalan. Beban-beban tersebut memiliki nilai prioritas kebutuhan dan nilai ekonomi bagi penggunanya.

2.8.1 Jenis Beban yang Dilepaskan

Ketika terjadi penurunan frekuensi akibat beban lebih, salah satu hal yang dapat dilakukan untuk mengatasinya adalah pelepasan beban. Pelepasan beban ini diharapkan untuk dapat memperbaiki frekuensi secara cepat tanpa harus banyak merugikan pengguna secara ekonomi. Oleh sebab itu, beban-beban yang disuplai oleh suatu generator sebaiknya diurutkan menurut parameter-parameter sebagai berikut :

- a. Sensitif terhadap kegiatan perekonomian
- b. Tingkat kesulitan pengasutan (*starting*)
- c. Daya yang dibutuhkan

Beberapa pertimbangan yang harus diperhatikan dalam memilih beban yang akan dilepaskan salah satunya adalah apakah beban tersebut sensitif terhadap kegiatan perekonomian. Jenis beban yang dilepaskan adalah beban yang

memiliki pengaruh paling rendah bagi perekonomian. Misalnya pada sistem tenaga listrik di suatu perusahaan minyak dan gas, beban yang tidak sensitif terhadap kegiatan usaha adalah rumah tinggal atau penginapan. Sedangkan beban yang sangat sensitif terhadap kegiatan usaha antara lain motor-motor untuk eksplorasi.

Parameter lain yang harus dipertimbangkan dalam memilih beban yang harus dilepaskan adalah tingkat kesulitan pengasutan. Suatu beban yang dipilih untuk dilepas adalah beban yang dapat dengan mudah dihubungkan lagi ke sistem apabila sistem telah bekerja secara normal. Misalnya, kebutuhan pelepasan beban sangat tinggi sehingga tidak cukup apabila hanya melepaskan beban pemukiman. Maka, dibutuhkan pelepasan beban lain misalnya motor. Dari motor-motor yang ada tersebut dipilih jenis motor yang mudah untuk *starting* kembali apabila sistem telah bekerja secara normal.

Parameter ketiga yang juga dipertimbangkan adalah daya yang diserap beban. Untuk memenuhi kebutuhan beban yang akan dilepaskan, terlebih dahulu diperhitungkan besar beban yang harus dilepaskan. Setelah didapatkan perkiraan beban tersebut, maka dipilihlah beban yang sesuai dengan kebutuhan. Dari ketiga pertimbangan tersebut maka beban yang dilepas semakin spesifik.

Jika terjadi kondisi di mana beban yang besarnya sesuai dengan kebutuhan memiliki sifat *starting* yang sedikit lebih sulit dibandingkan dengan beban lain yang menyerap daya lebih besar, maka beban tersebut harus dipertimbangkan lagi untuk dilepas atau tidak. Tahap *starting* suatu beban harus dipertimbangkan secara matang, mungkin pada saat pelepasan sistem cepat kembali normal dan tidak terjadi kelebihan suplai namun bila saat beban dihubungkan kembali dengan sistem akan menimbulkan permasalahan lain maka hal tersebut sebaiknya dihindari karena kerugian yang terjadi jauh lebih besar apabila beban yang dilepas lebih besar daripada yang dibutuhkan.

2.8.2 Perhitungan Beban yang Dilepaskan dan Frekuensi yang Diharapkan Setelah Pelepasan Beban

Besar beban yang dilepaskan dari suatu sistem untuk memulihkan frekuensi generator disesuaikan dengan tingkat frekuensi acuan yang telah diatur

pada rele. Pada persamaan (2.24) dan (2.27) telah dibahas mengenai perkiraan laju frekuensi dan frekuensi akhir ketika pemutus tenaga membuka. Untuk mendapatkan besarnya nilai beban yang harus dilepaskan terdapat beberapa parameter yang harus ditentukan dengan mempertimbangkan keandalan sistem, yaitu:

- a. Frekuensi yang diharapkan setelah pelepasan beban
- b. Waktu pemulihan

Dengan dilakukan suatu pelepasan beban diharapkan frekuensi generator cepat pulih. Oleh sebab itu, untuk mendapatkan besar beban yang dilepaskan sesuai dengan kebutuhan harus ditentukan nilai frekuensi dan waktu pemulihan yang diharapkan setelah dilakukan pelepasan beban. Kedua parameter ini digunakan untuk memperhitungkan nilai laju kenaikan frekuensi yang seharusnya terjadi.

$$f_n = f_0 + \frac{df}{dt}t \quad (2.30)$$

Dengan f_n = frekuensi yang diharapkan setelah pelepasan beban

f_0 = frekuensi generator ketika terjadi pelepasan beban

$\frac{df}{dt}$ = laju kenaikan frekuensi yang diharapkan

t = waktu pemulihan

Dengan mengetahui besarnya laju kenaikan yang diinginkan maka dengan persamaan 2.31 didapatkan nilai beban optimal yang harus dilepas.

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_{gen} - (P_{load} - P_{load\ shedding})}{2GH} \cdot f_n \quad (2.31)$$

Dimana $P_{load\ shedding}$ = besar beban yang harus dilepaskan.

Semakin tinggi nilai frekuensi dan semakin cepat waktu pemulihan yang diharapkan setelah pelepasan, maka nilai beban yang dilepas akan semakin besar. Pelepasan beban dapat dilakukan dalam beberapa tahap, sehingga pada tahap pertama beban yang dilepas tidak secara keseluruhan.

2.9 ETAP (Electrical Transient Analysis Program)

ETAP merupakan perangkat lunak yang dapat digunakan untuk mensimulasikan suatu keadaan transien dari sistem tenaga listrik. Perangkat lunak

ini dapat digunakan untuk merancang suatu diagram saluran tunggal dari suatu sistem tenaga listrik baik sistem AC maupun DC dengan menggunakan 2 macam standar yaitu ANSI dan IEC. Beberapa fitur analisa yang disediakan oleh ETAP antara lain:

- a. Load flow analysis
- b. Transient stability analysis
- c. Motor starting
- d. Star Coordination
- e. Short circuit analysis, dll.

Pada skripsi ini fitur ETAP yang digunakan untuk simulasi adalah fitur *transient stability analysis*, dengan simulasi ini dapat dilihat perubahan frekuensi ketika generator mulai lepas hingga terjadinya pelepasan beban.

2.9.1 Analisa Kestabilan Kondisi Transien

Fitur ETAP yang dapat mensimulasikan suatu pelepasan beban akibat adanya generator lepas adalah *transient stability analysis*. Dengan menggunakan fitur ini dapat disimulasikan beberapa kombinasi lepasnya generator dan menunjukkan respon frekuensi terhadap kejadian tersebut. Dalam skripsi ini pelepasan beban yang dilakukan mengacu kepada penurunan frekuensi akibat beban lebih. Oleh sebab itu, untuk dapat melepas beban digunakan rele frekuensi (*underfrequency relay*) yang akan mengirimkan sinyal kepada pemutus tenaga agar trip pada frekuensi tertentu. Untuk dapat menggunakan fitur ini dibutuhkan beberapa data:

- a. Generator
 - Impedansi generator
 - Konstanta inersia generator
 - Model governor turbin yang digunakan generator
 - Model exciter generator
- b. Data kombinasi generator yang dilepaskan
- c. Jumlah iterasi yang sesuai
- d. Pengaturan frekuensi acuan dan waktu tunda rele
- e. Data jumlah beban yang harus dilepaskan sesuai dengan besarnya penurunan frekuensi.

BAB 3

PELEPASAN BEBAN FREKUENSI RENDAH PADA SISTEM TENAGA LISTRIK CNOOC SES Ltd. DENGAN TEGANGAN OPERASI 13,8 kV

3.1 Unit Bisnis CNOOC SES Ltd.

China National Offshore Oil Company South East Sumatera Ltd. (CNOOC SES Ltd.) merupakan perusahaan kerjasama kontrak bagi hasil dengan PERTAMINA yang bekerja pada bidang pengeboran minyak dan gas di kawasan Kepulauan Seribu. Unit bisnis yang dimiliki oleh CNOOC SES Ltd. terdiri dari 3 area yaitu *South Bussiness Unit (SBU)*, *Central Business Unit (CBU)*, dan *North Bussiness Unit (NBU)*. Masing-masing unit bisnis memiliki beberapa anjungan, antara lain:

a. South Bussiness Unit (SBU)

- Cinta
- East Rama
- Kitty
- Lita
- Nora
- North Wanda
- Rama
- Selatan
- Suratmi
- South Wanda
- Wanda

b. Central Bussiness Unit (CBU)

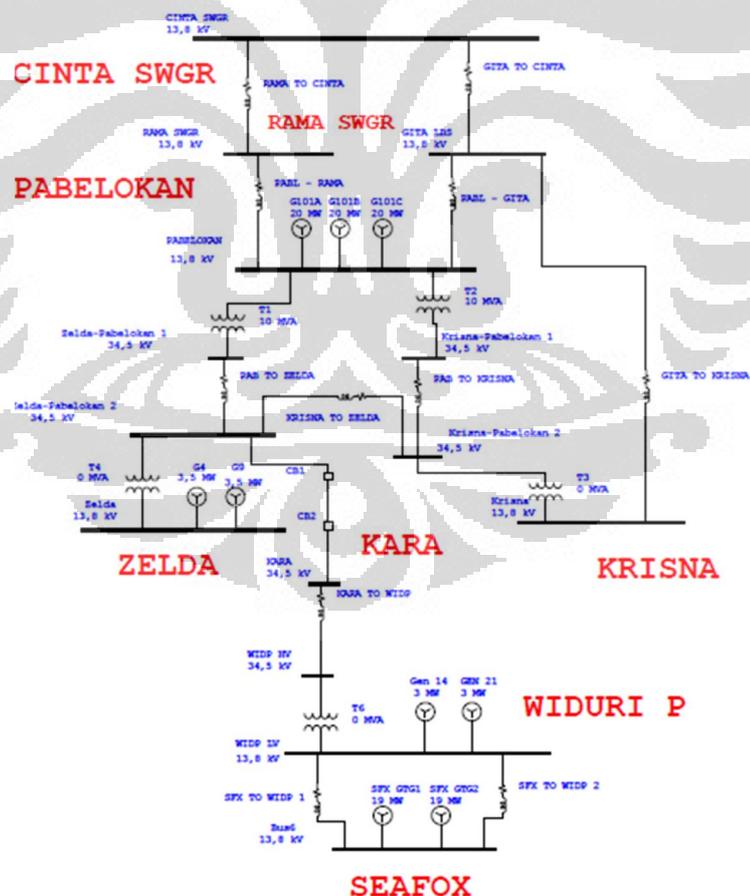
- Atti
- Farida
- Karmila
- Krisna
- Kartini
- Sundari
- South Zelda
- Titi
- Yvonne
- Zelda

c. North Bussiness Unit (NBU)

- Intan
- North East Intan
- Widuri
- Aida
- Indri
- Windri
- Lidya
- Vita
- Aryani

3.2 Sistem Tenaga Listrik pada Unit Bisnis CNOOC SES Ltd.

CNOOC SES Ltd. memiliki unit bisnis yang terletak di perairan Kepulauan Seribu. Masing-masing unit bisnis tersebut saling berinterkoneksi dengan menggunakan kabel bawah laut (*submarine cable*), hal ini bertujuan untuk menghindarkan terjadinya kekurangan suplai daya terhadap sumur-sumur pengeboran akibat adanya gangguan yang dapat menyebabkan turunnya tingkat produksi minyak dan gas. Sistem tenaga listrik pada unit bisnis CNOOC SES Ltd. menggunakan standar kelistrikan milik ANSI dan frekuensi sistem 60 Hz. Pada setiap unit bisnis terdapat pembangkit listrik tenaga gas dengan kapasitas generator dan pengaturan governor yang berbeda. Jarak rata-rata antar unit bisnis CNOOC SES Ltd. 40 km. Untuk mengurangi rugi-rugi daya, tegangan transmisi yang digunakan pada sistem ini mencapai 34,5 kV. Tegangan distribusi yang digunakan pada setiap anjungan adalah 13,8 kV, sedangkan tegangan kerja motor pada sumur pengeboran rata-rata 2,4 kV.



Gambar 3.1 Sistem Tenaga Listrik Unit Bisnis CNOOC SES Ltd.

Sistem tenaga listrik unit bisnis CNOOC SES Ltd. secara sederhana digambarkan pada gambar 3.1. Pembangkit listrik yang dimiliki unit bisnis CNOOC SES Ltd. terletak pada 4 blok yaitu Pabelokan, Zelda, WIDP dan Seafox. Pembangkit listrik yang terletak di blok Pabelokan akan menghasilkan daya listrik yang akan ditransmisikan ke SBU yaitu Rama *switchgear* dan Cinta *switchgear* serta CBU yaitu Zelda dan Krisna. Pada blok Zelda juga memiliki pembangkit listrik tenaga gas yang akan menambahkan daya dari Pabelokan untuk mensuplai daya untuk CBU dan NBU melalui *incoming* Kara. Suplai daya untuk NBU berasal dari pembangkit listrik yang terletak di blok WIDP, *incoming* Kara dan Seafox. Pembangkit listrik yang terletak pada NBU hanya menyuplai anjungan yang berada di NBU, apabila terjadi gangguan pada pembangkit listrik SBU dan CBU yang mengakibatkan kedua unit bisnis tersebut kekurangan suplai daya, maka pemutus daya pada *incoming* Kara akan trip dan tidak akan terjadi aliran daya dari NBU ke South Central Bussiness Unit. Begitu juga ketika terjadi gangguan di NBU sehingga mengharuskan pembangkit listrik di South Central Bussiness Unit menyuplai daya ke NBU lebih dari 13 MW maka pemutus daya pada *incoming* Kara akan *trip*. Hal ini dikarenakan pada anjungan yang menghasilkan tingkat BOPD tinggi berada di NBU dan daya kabel transmisi KARA TO WIDP maksimal adalah 13 MW.

3.2.1 Sistem Pembangkit Tenaga Listrik

Pembangkit listrik yang digunakan pada unit bisnis CNOOC SES Ltd. menggunakan turbin gas sebagai penggerak utama. Masing-masing unit bisnis memiliki kapasitas dan pengaturan governor yang berbeda yaitu:

- a. South Business Unit (Pabelokan)

Tabel 3.1 Kapasitas dan Pengaturan Generator South Business Unit

Generator	Rating Kapasitas (MVA)	Faktor Daya (pf)	Governor	Daya Operasi (MW)
G101A	25	0,8	Isoch	20
G101B	25	0,8	Isoch	20
G101C	25	0,8	Isoch	20

Generator pada blok Pabelokan memiliki kapasitas maksimum 25 MVA dan faktor daya 0,8. Namun karena usia generator tersebut relatif sudah tua, maka untuk kesehariannya daya yang mampu dihasilkan maksimal hanya 18-19 MW. Ketika terjadi gangguan pada generator lain yang dapat mengakibatkan suplai generator Pabelokan meningkat hingga lebih dari 20 MW, maka skema pelepasan beban akan bekerja. Pengaturan governor yang digunakan pada ketiga generator tersebut adalah *isochronous*, artinya daya yang mampu disuplai oleh generator mengikuti fluktuasi besar beban dalam rentang kerja generator. Mode operasi ketiga generator tersebut pada simulasi ETAP adalah mode *swing*, dimana tegangan kerja generator tersebut dibuat selalu konstan dan menjadi tegangan dasar (*base voltage*) bagi sistem.

b. Central Business Unit (Zelda)

Tabel 3.2 Kapasitas dan Pengaturan Generator Central Business Unit

Generator	Rating Kapasitas (MVA)	Faktor Daya (pf)	Governor	Daya Operasi (MW)
G4	5,938	0,8	Droop	3,5
G9	5,938	0,8	Droop	3,5

Generator yang dimiliki oleh CBU (blok Zelda) memiliki karakteristik governor *droop*, dimana kecepatan turbin akan selalu konstan dengan berbagai variasi beban sehingga daya keluaran generator tetap. Pada sistem ini daya keluaran generator diatur 3,5 MW pada kondisi apapun. Pada simulasi ETAP, mode operasi yang digunakan generator blok Zelda adalah PF control. Generator dengan mode ini memiliki faktor daya yang konstan pada setiap kondisi, sehingga daya aktif dan daya reaktif yang dihasilkan pun tetap. Hal ini mengacu kepada karakteristik governor droop yang dimiliki generator.

c. North Business Unit (WIDP dan Seafox)

Tabel 3.3 Kapasitas dan Pengaturan Generator North Business Unit

Generator	Rating Kapasitas (MVA)	Faktor Daya (pf)	Governor	Daya Operasi (MW)
Gen14	5,338	0,8	Droop	3
GEN 21	5,338	0,8	Droop	3
SFX GTG1	25	0,8	Droop	19
SFX GTG2	25	0,8	Droop	19

Generator di NBU memiliki karakteristik yang sama dengan generator blok Zelda. Hanya saja daya keluaran generator yang ditentukan di WIDP adalah 3 MW sedangkan generator di Seafox 19 MW.

3.2.1.1 Pengaturan Generator

Dengan menggunakan *transient stability analysis*, salah satu fitur yang disediakan ETAP, pelepasan beban akibat beban lebih dapat disimulasikan. Untuk dapat melakukan simulasi tersebut diperlukan data mode *exciter* dan mode governor yang dimiliki oleh generator. Pada generator yang berada pada sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. mode *exciter* yang digunakan adalah mode standar IEEE ST4B, AC1 dan AC3. Sedangkan mode governor yang digunakan adalah GGOV 3 (*General Electric General Governor*).

3.2.2 Sistem Transmisi dan Distribusi

Unit bisnis CNOOC SES Ltd terdiri dari 3 area yaitu area selatan, area tengah dan area utara. Masing-masing area dihubungkan dengan suatu kabel transmisi bawah laut dengan tegangan 34,5 kV. Sistem distribusi yang digunakan oleh CNOOC SES Ltd adalah semi *ring* dan radial. CNOOC SES Ltd. memiliki beberapa *switchgear*, masing-masing *switchgear* dihubungkan secara *ring* yaitu disuplai oleh lebih dari satu titik pembangkitan. Tegangan yang digunakan pada sistem distribusi ini adalah 13,8 kV. *Switchgear* atau anjungan utama yang dimiliki oleh CNOOC SES Ltd antara lain:

- a. Rama
- b. Cinta
- c. Gita
- d. Zelda
- e. Krisna
- f. WidP
- g. Seafox

Selanjutnya, daya dari masing-masing *switchgear* didistribusikan ke anjungan-anjungan yang saling berdekatan dengan menggunakan sistem radial. Sistem distribusi radial adalah sistem distribusi dimana beban disuplai dari satu titik sumber, jika terjadi gangguan pada saluran distribusi tersebut maka beban ini tidak akan mendapatkan suplai dari sumber yang lain. Pada masing-masing anjungan terdapat beberapa pompa yang menggunakan motor induksi dengan tegangan 2,4 kV dan 1 kV. Sehingga tegangan dari *switchgear* sebesar 13,8 kV harus diturunkan dengan menggunakan transformator penurun tegangan.

3.3 Jenis Beban pada Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd.

Beban yang terdapat pada sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. antara lain anjungan sumur, anjungan proses, motor serta lampu penerangan pemrosesan gas (*gas processing plant*) dan area pembangkitan listrik (*power plant*). Sistem transmisi menggunakan kabel bawah laut (*submarine cable*) yang panjangnya kurang lebih 40 km sehingga daya yang hilang pada sistem transmisi ini cukup signifikan. Beban terbesar dari sistem tenaga listrik ini adalah motor-motor induksi ESP (*electrical submergible pump*) yang digunakan pada anjungan sumur, proses maupun area pemrosesan gas.

Berikut ini adalah tabel persebaran beban pada sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd.

Tabel 3.4 Persebaran Beban Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd

Jenis Beban	Daya Aktif (kW)	PF
Sumur SBU	12131,0	0,82
Sumur CBU	6388,0	0,82
Sumur NBU	43810,5	0,82
Gas Plant	14418,0	0,82
Kantor dan hotel Pabl	1280,0	0,92
Motor anjungan proses	8311,0	0,82

Terlihat bahwa beban paling besar ada di area unit bisnis utara. Sehingga untuk mengurangi banyaknya produksi yang hilang (*loss of production*), ketika pembangkit listrik di SBU lepas maka pemutus tenaga di *incoming* Kara bekerja. Hal ini dapat menghambat adanya aliran daya dari sisi NBU ke SBU, adanya aliran daya dari NBU ke SBU dipandang membahayakan bagi kelangsungan produksi di sisi NBU karena ketersediaan daya yang terbatas.

Pelepasan beban adalah fenomena pada sistem tenaga listrik yang memungkinkan beberapa beban keluar dari sistem demi tercapainya kestabilan sistem tenaga listrik itu sendiri. Adapun jumlah dan pemilihan beban yang dilepas harus diperhitungkan terlebih dahulu dan ditentukan sesuai dengan kebutuhan dan tingkat prioritas beban tersebut bagi sistem. Pada suatu sistem tenaga listrik yang dimiliki oleh perusahaan minyak dan gas, tingkat prioritas beban yang dilepaskan dapat dilihat dari:

- a. Besar daya yang diserap
- b. Jumlah minyak atau gas yang dihasilkan setiap hari (*Barrel Oil Per Day/BOPD*)
- c. Tingkat kesulitan pengasutan
- d. Kualitas minyak atau gas yang dihasilkan

Pada sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. jenis beban yang dimiliki terdiri dari 2 jenis, yaitu:

a. Motor induksi

Motor induksi pada sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. digunakan sebagai pompa di sumur-sumur pengeboran. Jenis motor yang digunakan adalah *electrical submergible pump* (ESP), motor ini memiliki inersia yang cukup kecil, sehingga ketika terjadi gangguan tidak akan memberikan efek yang signifikan terhadap sistem. Selain itu, motor induksi juga digunakan pada *gas plant* sebagai kompresor. Dalam simulasi menggunakan ETAP sebagian besar motor-motor ini disajikan dalam suatu kumpulan beban (*lumped load*) dengan persentase beban motor (*motor load*) 100% dan beban statis (*static load*) 0% yang memiliki faktor daya 0,82.

b. Lampu penerangan, hotel dan telekomunikasi

Beban lain yang terdapat di sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. adalah lampu penerangan, hotel dan telekomunikasi yang memiliki daya tidak terlalu besar bila dibandingkan dengan motor produksi. Pada simulasi ETAP, beban jenis ini disajikan dalam bentuk kumpulan beban (*lumped load*) dengan kombinasi beban motor (*motor load*) 0% dan beban statis (*static load*) 100% dengan faktor daya 0.92.

3.3.1 Beban Unit Bisnis Area Selatan (SBU)

Unit bisnis area selatan memiliki beberapa komponen beban yaitu area pembangkit listrik, hotel, fasilitas penyulingan air, sumur pengeboran maupun anjungan proses. Berikut ini adalah tabel yang menyajikan data beban dan *barrel* minyak yang dihasilkan oleh anjungan di area unit bisnis Selatan.

Tabel 3.5 Daya Konsumsi Beban dan Barrel per Hari Anjungan SBU

Platform	Real Power (kW)	BOPD
CINTA - A	207	255
CINTA - B	786	348
CINTA - C	1488	1743
CINTA - D	695	1196

Tabel 3.5 Daya Konsumsi Beban dan Barrel per Hari Anjungan SBU (lanjutan)

Platform	Real Power (kW)	BOPD
CINTA - E	537	319
CINTA - F	370	149
CINTA - G	446	989
CINTA - H	813	690
EAST RAMA - A	1315	890
KITTY - A	339	714
LITA - A	117	36
NORA - A	442	347
N. WANDA - A	394	1172
N. WANDA - B	90	88
RAMA - A	547	534
RAMA - B	324	688
RAMA - C	182	87
RAMA - D	155	1129
RAMA - F	153	97
RAMA - G	304	439
RAMA - H	488	1828
RAMA - I	92	390
SELATAN - A	884	673
SURATMI - A	432	55
S.W. WANDA - A	250	970
WANDA - A	281	55

3.3.2 Beban Unit Bisnis Area Tengah (CBU)

Unit bisnis area tengah CNOOC SES Ltd memiliki komponen beban yaitu sumur pengeboran dan anjungan proses. Masing-masing anjungan memiliki fasilitas penerangan, namun dalam perhitungan nantinya beban listrik berupa fasilitas penerangan akan diabaikan karena nilainya yang cukup kecil sehingga tidak memberikan efek yang berarti apabila dimasukkan ke dalam perhitungan. Berikut ini adalah daftar beban dan *barrel* minyak per hari dari anjungan unit bisnis area tengah:

Tabel 3.6 Daya Konsumsi Beban dan Barrel per Hari Anjungan CBU

Platform	Real Power (kW)	BOPD
ATTI - A	208	344
FARIDA - B	334	782
FARIDA - C	90	260
KARMILA - A	669	374
KRISNA - A	333	114
KRISNA - B	272	1380
KRISNA - C	342	547
KRISNA - D	388	1681
KRISNA - E	205	690
KARTINI - A	278	449
SUNDARI - A	820	707
SUNDARI - B	973	750
S. ZELDA - A	198	190
TERESIA - A	51	168
TITI - A	116	422
YVONNE - A	90	127
YVONNE - B	177	583
ZELDA - A	35	128
ZELDA - B	47	107
ZELDA - C	275	0
ZELDA - D	286	263
ZELDA - E	201	444

3.3.3 Beban Unit Bisnis Area Utara (NBU)

Unit bisnis area utara merupakan unit bisnis yang menghasilkan *barrel* minyak per hari terbesar yang dimiliki oleh CNOOC SES Ltd. Hal ini mengakibatkan daya beban yang ditarik dari pembangkit jauh lebih besar bila dibandingkan dengan unit bisnis lainnya. Pada kondisi normal, pembangkit listrik yang berada di NBU tidak mampu memenuhi suplai daya terhadap anjungan-anjungan di NBU, maka pembangkit listrik di SBU (Pabelokan) yang menghasilkan daya yang lebih besar harus mensuplai kebutuhan beban di NBU

melalui *incoming* KARA. Berikut ini adalah daftar anjungan yang terletak di NBU beserta beban (kW) dan *barrel* minyak per hari yang mampu dihasilkan.

Tabel 3.7 Daya Konsumsi Beban dan Barrel per Hari Anjungan NBU

Platform	Real Power (kW)	BOPD
INTAN - A	4995,44	2059
INTAN - B	5553,8	2013
NORTH EAST INTAN	3349	2105
NEIAC	2198,4	613
WIDURI - A	4663	3233
WIDURI - B	4711,6	2289
WIDURI - C	3225,06	1834
WIDURI - D	4937,22	2639
WIDURI - E	1517	1025
WIDURI - F	206,4	95
WIDURI - G	1963,9	723
WIDURI - H	510,8	550
AIDA - A	3540	1344
INDRI - A	1594,9	1573
WINDRI - A	975,6	963
LIDYA - A	47,7	150
VITA - A	1045	304
ARYANI - A	85	366

3.4 Skema Pelepasan Beban Akibat Frekuensi Rendah CNOOC SES Ltd.

Skema pelepasan beban akibat frekuensi rendah yang diberlakukan di sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. dibedakan menjadi 3 area, yaitu:

a. Area Selatan

Pada area selatan berlaku DTT (*Direct Transfer Trip*) pada saluran yang menuju Rama-P dan Nora pada *switchgear* di Pabelokan. DTT merupakan aksi pelepasan beban tanpa memiliki tahapan frekuensi pelepasan, artinya ketika terdeteksi adanya penurunan frekuensi pemutus tenaga yang terletak pada saluran menuju Rama-P dan Nora bekerja.

b. Area Tengah

Skema pelepasan beban akibat frekuensi rendah pada area tengah hanya berlaku pada anjungan yang berada di blok Krisna *switchgear* dan hanya terdapat 1 tahap pelepasan beban yaitu:

Tabel 3.8 Skema Pelepasan Beban yang Diterapkan CBU

Frekuensi (Hz)	Waktu Tunda (s)	Anjungan
58,6	3,6	Krisna – C
		Krisna – D
		Krisna – A/E/YVOA
		Krisna – B
		Sun – A/B

c. Area Utara

Suplai daya listrik yang digunakan unit bisnis area Utara dihasilkan oleh pembangkit listrik yang berada di Pabelokan, Widuri-P dan Seafox. Aliran daya listrik yang berasal dari pembangkit di Pabelokan ke unit bisnis area Utara melewati kabel C-85 (*incoming* Karmila-A). Kualitas kabel yang terus menurun menyebabkan adanya batasan daya yang diijinkan mengalir pada kabel tersebut. Adanya kekurangan suplai di unit bisnis area Utara akibat lepasnya pembangkit area Utara membuat aliran suplai daya dari Selatan menuju Utara semakin besar. Sistem mengijinkan daya listrik maksimal yang mengalir dari Selatan ke Utara adalah 13 MW, artinya ketika suplai daya yang melewati kabel tersebut melebihi 13 MW pemutus tenaga pada *incoming* Kara bekerja.

Skema pelepasan beban berkaitan dengan pelepasan beban akibat frekuensi rendah di unit bisnis area Utara dilakukan secara bertahap. Namun, tahapan pelepasan beban akibat frekuensi rendah yang dimiliki oleh unit bisnis area Utara belum mempertimbangkan BOPD (*Barrel Oil Per Day*) yang dimiliki oleh setiap anjungan. Berikut ini adalah tahapan pelepasan beban yang dimiliki oleh unit bisnis area Utara:

Tabel 3.9 Skema Pelepasan Beban yang Diterapkan NBU

LSS	Frekuensi dan Waktu Tunda	Penyulang Dilepas	kW	BOPD
LSS1 [Hz1]	59,40	WIDE/AIDA	5057	2369
LSS1 [T1]	9,00			
LSS2 [Hz2]	59,20	WIDC/WIDD	8162,28	4473
LSS2 [T2]	7,00			
LSS3 [Hz3]	58,60	WIDB	4711,6	2289
LSS3 [T3]	1,20			

Skema pelepasan beban terdiri dari 3 tahap yaitu ketika frekuensi turun hingga mencapai 59,4 Hz selama 9 detik, maka pemutus tenaga pada penyulang WIDE/AIDA di Seafox akan bekerja. Kemudian tahap kedua dari skema pelepasan beban adalah ketika frekuensi sistem tenaga listrik NBU mencapai 59,2 Hz, pemutus tenaga penyulang WIDC/WIDD di WIDP dan Seafox akan bekerja setelah hal ini berlangsung selama 7 detik. Sedangkan untuk tahap ketiga ketika frekuensi turun terus menerus hingga mencapai 58,6 Hz, maka setelah 1,2 detik pemutus tenaga pada penyulang WIDB di WIDP bekerja.

BAB 4

PERANCANGAN SIMULASI PELEPASAN BEBAN DENGAN UNDER FREQUENCY RELAY

4.1 Kombinasi Generator Lepas

Dalam perancangan ini akan membahas tentang simulasi pelepasan beban yang terjadi akibat adanya penurunan frekuensi karena beban lebih. Terjadinya beban lebih dalam simulasi disebabkan oleh adanya generator yang lepas dari sistem. Penyebab dari lepasnya generator tidak dibahas secara detail. Untuk dapat memperkirakan besarnya frekuensi acuan pelepasan beban, maka dibuatlah beberapa kombinasi generator lepas. Berikut ini adalah beberapa skenario generator lepas yang dilakukan pada perangkat lunak ETAP:

Tabel 4.1 Kombinasi Generator Lepas

No	G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
17	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
18	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
19	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
21	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
22	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
23	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0
24	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
25	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabel 4.1 Kombinasi Generator Lepas (lanjutan)

No	G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2
26	√	√	√			√	√		
27	√	√	√		√		√		
28	√	√	√				√		
29	√	√	√						√
30	√	√	√		√				
31	√	√	√						
32	√	√	√	√	√		√	√	√
32	√	√	√	√	√			√	√
34	√	√	√	√	√		√		√
35	√	√	√	√	√				√
36	√	√	√	√	√		√		
37	√	√	√	√	√				
38	√	√	√	√	√	√	√		√
39	√	√	√	√	√	√	√		
40		√	√		√		√	√	√
41		√	√		√	√	√		√
42		√	√	√	√		√		√
43		√	√				√	√	√
44		√	√			√	√		√
45		√	√		√	√	√		
46		√	√	√	√		√		
47		√	√		√		√		√
48		√	√	√	√				√
49		√	√		√			√	√
50		√	√					√	√
51		√	√		√				√
52		√	√		√		√		
53		√	√	√	√				
54		√	√			√	√		
55		√	√				√		√
56		√	√						√
57		√	√				√		
58		√	√		√				
59		√	√						
60			√		√		√	√	√
61			√		√	√	√		√
62			√	√	√		√		√
63			√			√	√	√	√
64			√	√	√			√	√
65			√	√	√	√	√		
66			√				√	√	√

Universitas Indonesia

Tabel 4.1 Kombinasi Generator Lepas (lanjutan)

No	G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2
67			✓			✓	✓		
68			✓		✓			✓	✓
69			✓		✓	✓	✓		
70			✓	✓	✓				✓
71			✓	✓	✓		✓		
72			✓				✓	✓	✓
73			✓					✓	✓
74			✓		✓		✓		
75			✓		✓				✓
76			✓	✓	✓				
77			✓			✓	✓		
78			✓						✓
79			✓			✓			
80			✓		✓				
81			✓						

Keterangan :

	: generator lepas
✓	: generator aktif bekerja

4.2 Tahapan Frekuensi Kerja

Untuk dapat mengatasi terjadinya penurunan frekuensi pada sistem tenaga listrik yang dapat mengakibatkan kegagalan kerja pada generator, maka dilakukanlah suatu pelepasan beban untuk memulihkan frekuensi tersebut. Pada bab sebelumnya telah dibahas mengenai syarat-syarat yang harus dipenuhi untuk dapat melakukan pelepasan beban. Syarat tersebut antara lain adalah beban dilepas secara bertahap. Hal ini bertujuan untuk mengantisipasi apabila pelepasan beban tahap pertama telah dilakukan tetapi frekuensi belum juga pulih, masih dapat dilakukan pelepasan beban tahap berikutnya untuk memperbaiki frekuensi. Oleh sebab itu, diperlukan perhitungan untuk dapat menentukan pada frekuensi berapa dan besar beban yang dilepaskan pada setiap tahapan frekuensi tersebut. Penentuan tahapan frekuensi mengacu kepada standar internasional IEEE C37-106 2003 dan variasi penurunan frekuensi per detik yang mungkin terjadi didapatkan dari kombinasi generator lepas pada sub bab sebelumnya. Untuk dapat memperkirakan tahapan frekuensi kerja rele frekuensi ketika terjadi penurunan

frekuensi pada sistem tenaga listrik, beberapa hal yang harus dilakukan antara lain:

1. Memperkirakan variasi penurunan frekuensi per detik dari beberapa skenario kombinasi pelepasan generator yang telah ditentukan sebelumnya dengan menggunakan persamaan *swing* (*swing equation*).

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{P_s}{2GH} \right) \times f_0$$

Beberapa parameter yang digunakan untuk dapat menentukan besarnya penurunan frekuensi per detik antara lain adalah besar kelebihan beban dari masing-masing skenario, rata-rata *rating* MVA generator yang digunakan pada sistem tenaga listrik tersebut, rata-rata konstanta inersia yang dimiliki generator, dan frekuensi nominal sistem.

Sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. memiliki 9 buah generator yang memiliki kapasitas serta konstanta inersia yang bervariasi. Dengan menggunakan persamaan (2.17) didapatkan rata-rata konstanta inersia serta kapasitas generator seperti yang disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4.2 Kapasitas dan Konstanta Inersia (H) Generator CNOOC SES Ltd

Generator	MVA	H (MJ/MVA)
G101A	25,000	7,39
G101B	25,000	7,39
G101C	25,000	8,14
G4	5,938	0,584
G9	5,938	0,584
Gen 14	5,338	1,538
GEN 21	5,338	1,538
SFX GTG1	25,000	7,39
SFX GTG2	25,000	7,39
rata-rata	16,40	6,55

2. Setelah mendapatkan beberapa kemungkinan penurunan frekuensi, untuk dapat menentukan pada frekuensi berapa pemutus tenaga benar-

benar bekerja dibutuhkan perkiraan waktu kerja rele. Waktu kerja rele dipengaruhi oleh waktu *pick up*, waktu rele dan waktu pemutus tenaga. Waktu *pick up* dipengaruhi oleh besarnya penurunan frekuensi per detik sehingga nilai waktu *pick up* akan berbeda di setiap kombinasi. Untuk dapat memperoleh nilai waktu *pick up* di setiap kombinasi maka digunakan formula berikut ini:

$$t_{pick-up} = \frac{f_0 - f_1}{\frac{df}{dt}}$$

Frekuensi acuan tahap pertama yang digunakan adalah 59,5 Hz dengan waktu tunda 2,5 detik dengan mengingat frekuensi minimal yang diijinkan untuk generator turbin gas bekerja tanpa batas waktu dengan frekuensi nominal 60 Hz sesuai standar internasional IEEE C37-106 2003 adalah 59,5 Hz. Waktu kerja rele yang digunakan 50 ms dan waktu kerja pemutus tenaga hingga rangkaian terbuka adalah 100 ms. Kemudian, lamanya waktu kerja rele mulai dari *pick up* hingga pemutus tenaga bekerja dapat dihitung dengan menggunakan formula berikut ini:

$$t_{trip} = t_{pick-up} + t_{CB} + t_{relay}$$

$$t_{trip} = t_{pick up} + 0,15$$

3. Perkiraan nilai frekuensi saat pemutus tenaga bekerja ketika terjadi penurunan frekuensi bergantung pada kedua hal yang dibahas sebelumnya yaitu penurunan frekuensi per detik dan waktu kerja rele.

$$f_{load shedding} = \left[f_n - \frac{df}{dt}(t_{trip}) \right]$$

Perkiraan nilai frekuensi saat pemutus tenaga benar-benar bekerja nantinya dapat digunakan sebagai pedoman dalam menentukan tahap pelepasan beban kedua dan seterusnya dengan menggunakan tahap pelepasan beban pertama adalah ketika frekuensi sistem turun hingga 59,5 Hz. Dari skenario kombinasi generator lepas terdapat berbagai variasi nilai frekuensi ketika pemutus tenaga benar-benar bekerja. Dari variasi nilai tersebut, nilai frekuensi yang paling tinggi akan

menjadi pedoman untuk pelepasan beban tahap kedua, yaitu sedikit lebih kecil dari nilai frekuensi tersebut.

4. Penentuan jumlah pelepasan beban yang dilakukan merupakan kreasi dari perancang sistem pelepasan beban. Pada skema pelepasan beban sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. ini penulis menentukan pelepasan beban tahap terakhir adalah 58,35 dengan mempertimbangkan kemampuan sistem tenaga listrik dalam pemulihan frekuensi yang masih dalam rentang yang diijinkan oleh standar IEEE C37-106 2003 yaitu 10 detik.

Berikut ini adalah hasil akhir perkiraan frekuensi *trip* dari skenario kombinasi generator lepas yang memiliki rentang nilai 59,5 – 58,35 Hz serta perkiraan penurunan frekuensi yang mungkin terjadi saat skenario dijalankan. Perhitungan setiap tahap sebelum mendapatkan nilai frekuensi trip akan disajikan di lampiran.



Tabel 4.3 Hasil Perkiraan Frekuensi Trip dengan Menggunakan Persamaan Swing Generator

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	df/dt (Hz/s)	Frekuensi (Hz)
									-1,25	59,31
									-1,81	59,23
									-1,95	59,21
									-2,09	59,19
									-2,23	59,17
									-2,64	59,1
									-2,78	59,08
									-2,92	59,06
									-2,92	59,06
									-3,06	59,04
									-3,2	59,02
									-3,76	58,93
									-3,9	58,91
									-4,04	58,89
									-4,6	58,81
									-4,88	58,77

Tabel 4.3 Hasil Perkiraan Frekuensi Trip dengan Menggunakan Persamaan Swing Generator (lanjutan)

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	df/dt (Hz/s)	Frekuensi (Hz)
									-6,28	58,56
									-6,55	58,52
									-6,83	58,47
									-7,11	58,43
									-7,25	58,41
									-7,39	58,39
									-7,53	58,37
									-7,67	58,35
									-7,81	58,33
									-7,95	58,31
									-8,09	58,29
									-8,23	58,27
									-8,23	58,27
									-8,43	58,23
									-8,51	58,22

Dengan mengikuti langkah-langkah penentuan tahapan frekuensi tersebut didapatkan 7 tahap pelepasan beban, yaitu:

Tabel 4.4 Frekuensi Acuan Skema Pelepasan Beban Akibat Frekuensi Rendah Hasil Perhitungan dengan Persamaan Swing Generator

Tahap ke-	Frekuensi (Hz) (pick up)
1	59,5
2	59,3
3	59,15
4	59
5	58,75
6	58,5
7	58,35

4.3 Perhitungan Jumlah Beban yang Dilepas

Ketepatan dalam menentukan jumlah beban yang dilepas saat frekuensi mencapai nilai tertentu, sangat diperlukan dalam pelepasan beban. Untuk sebuah perusahaan yang bergerak dalam bidang minyak dan gas, jumlah beban yang dilepaskan berkaitan dengan jumlah produksi yang hilang. Tentu saja nilai tersebut harus dirancang seminimal mungkin tanpa mengurangi unjuk kerja sistem tenaga listrik. Jumlah beban yang harus dilepaskan untuk memulihkan frekuensi bergantung pada kecepatan pemulihan frekuensi yang diharapkan. Untuk dapat memperkirakan kecepatan pemulihan yang terjadi setelah pelepasan beban, hal yang harus ditentukan adalah lamanya waktu pemulihan yang ingin dicapai. Waktu pemulihan yang diharapkan ketika terjadi penurunan frekuensi pada sistem tenaga listrik ini adalah 5 detik. Dengan menggunakan persamaan berikut pada setiap skenario, maka akan didapatkan variasi kecepatan pemulihan frekuensi dimana frekuensi awal setiap skenario adalah frekuensi ketika pemutus tenaga bekerja:

$$f_n = f_0 + \frac{df}{dt} t$$

Berikut ini adalah tabel yang menyajikan tingkat frekuensi saat pemutus tenaga bekerja serta kecepatan pemulihan yang diharapkan ketika dilakukan suatu pelepasan beban, perhitungan secara detil akan disajikan pada lampiran:

Tabel 4.5 Kecepatan Pemulihan Frekuensi yang Diharapkan Pada Setiap Frekuensi Trip Pemutus Tenaga

Frekuensi Awal (f_0)	Kecepatan Pemulihan Frekuensi (df/dt)
59,31	0,137
59,16	0,167
59,02	0,196
58,77	0,246
58,52	0,297
58,37	0,327
58,22	0,356

Dengan menggunakan nilai kecepatan pemulihan frekuensi yang harus dicapai maka dapat ditentukan besarnya beban yang harus dilepas dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_{gen} - (P_{load} - P_{load\ shedding})}{2GH} \cdot f_0$$

Tabel 4.6 Beban minimal yang Harus Dilepas Untuk Memulihkan Frekuensi

Tahap ke-	Perkiraan Frekuensi Trip	df/dt pemulihan	Beban Dilepas (MW)
1	59,31	0,137	4,99
2	59,16	0,167	8,61
3	59,02	0,196	12,22
4	58,77	0,246	18,41
5	58,52	0,297	24,6
6	58,36	0,327	28,21
7	58,22	0,356	31,82

Pelepasan beban bagi perusahaan minyak dan gas adalah suatu hal yang sangat dihindari. Hal ini berkaitan dengan penurunan jumlah produksi dan

kerugian yang cukup besar yang akan dialami perusahaan. Ketika terjadi penurunan frekuensi akibat beban lebih perlu dilakukan suatu pelepasan beban agar sistem tenaga listrik dapat kembali normal atau stabil. Oleh karena itu, besar beban yang dilepaskan dirancang seminimal mungkin dengan kemampuan menghasilkan *barrel* minyak per hari yang tidak terlalu besar.

Parameter yang dapat dijadikan bahan pertimbangan pemilihan beban untuk dilepas ketika terjadi penurunan frekuensi antara lain:

a. Perhitungan kW/BOPD

Beban yang memiliki daya konsumsi cukup besar dan dapat memulihkan frekuensi dengan cepat jika dilepas pada suatu perusahaan minyak dan gas adalah beban-beban motor pompa yang terdapat di lapangan. Untuk sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. beban yang dilepas untuk kepentingan pemulihan frekuensi merupakan beban dengan tingkat tegangan 13,8 kV. Hal ini disebabkan oleh kapasitas generator yang dimiliki cukup besar sehingga ketika salah satu generator lepas, maka kompensasi beban yang dilepaskan juga cukup besar untuk mengimbangi kehilangan suplai tersebut. Beban dengan tingkat tegangan 13,8 kV memiliki daya konsumsi yang cukup besar mencapai ratusan bahkan ribuan kW, sehingga dengan melepas beban tersebut akan mempercepat proses pemulihan frekuensi.

Untuk mendapatkan anjungan dengan tingkat tegangan 13,8 kV yang memiliki daya konsumsi besar dan produksi minyak per hari paling sedikit, diperlukan perhitungan kW/BOPD dari masing-masing anjungan. Nilai kW/BOPD tersebut diurutkan mulai dari nilai yang terbesar hingga terkecil. Beban yang memiliki peluang paling besar untuk dilepaskan adalah beban yang memiliki kW/BOPD paling tinggi. Beban yang memiliki nilai kW/BOPD tinggi artinya beban tersebut membutuhkan konsumsi daya yang besar namun produksi minyak yang dihasilkan kecil dan memiliki pengaruh kecil terhadap kerugian perusahaan.

Berikut ini adalah tabel yang menyajikan perhitungan kW/BOPD unit bisnis Selatan, Tengah dan Utara CNOOC SES Ltd.

Tabel 4.7 Perhitungan kW/BOPD Unit Bisnis Selatan dan Unit Bisnis Tengah

PLATFORM	KW	BOPD	KW/BOPD
WANDA - A	281	55	5,109090909
KRISNA - A	333	114	2,921052632
CINTA - F	370	149	2,483221477
RAMA - C	182	87	2,091954023
KARMILA - A	669	374	1,788770053
CINTA - E	537	319	1,68338558
RAMA - F	153	97	1,577319588
SELATAN - A	884	673	1,313521545
NORA - A	442	347	1,273775216
CINTA - H	813	690	1,17826087
SUNDARI - A	820	707	1,159830269
RAMA - A	547	534	1,024344569
CINTA - C	1488	1743	0,853700516
CINTA - A	207	255	0,811764706
YVONNE - A	90	127	0,708661417
RAMA - G	304	439	0,692482916
KRISNA - C	342	547	0,625228519
KARTINI - A	278	449	0,619153675
CINTA - D	695	1196	0,581103679
KITTY - A	339	714	0,474789916
RAMA - B	324	688	0,470930233
CINTA - G	446	989	0,450960566
FARIDA - B	334	782	0,427109974
KRISNA - E	205	690	0,297101449
TITI - A	116	422	0,274881517
RAMA - H	488	1828	0,266958425
RAMA - I	92	390	0,235897436
KRISNA - D	388	1681	0,230814991
KRISNA - B	272	1380	0,197101449
RAMA - D	155	1129	0,137289637

Tabel 4.8 Perhitungan kW/BOPD Unit Bisnis Utara CNOOC SES Ltd.

PLATFORM	KW	BOPD	KW/BOPD
NEIAC	2198,4	613	3,5862969
VITA - A	1045	304	3,4375
WIDURI - G	1963,9	723	2,716320885
AIDA - A	3540	1344	2,633928571
INTAN - A	4995,44	2059	2,426148616
WIDURI - F	206,4	95	2,172631579
INTAN - B	4244,32	2013	2,108966716
WIDURI - B	4711,6	2289	2,058366099
WIDURI - D	4937,22	2639	1,870867753
WIDURI - C	3225,06	1834	1,758484188
NORTH EAST INTAN	3349	2105	1,590973872
WIDURI - E	1517	1025	1,48
WIDURI - A	4663,2	3233	1,442375503
INDRI - A	1594,9	1573	1,013922441
WINDRI - A	975,6	963	1,013084112
WIDURI - H	510,8	550	0,928727273
LIDYA - A	47,7	150	0,318
ARYANI - A	85	366	0,232240437

b. Tingkat Kesulitan Pengasutan

Selain pertimbangan kW/BOPD, pemilihan beban yang dapat dilepaskan adalah tingkat kesulitan pengasutan beban setelah sistem kembali normal. Meskipun beban yang dilepas memiliki nilai kW/BOPD tinggi, tetapi jika beban tersebut nantinya menimbulkan masalah baru ketika sistem kembali normal pada saat pengasutan, kemungkinan besar peluang beban tersebut untuk dilepas akan sangat kecil. Berikut ini adalah kendala-kendala yang dialami oleh beberapa beban di sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. sehingga menyebabkan beban-beban tersebut tidak efektif bila dilepaskan:

a. Monopod

Beban yang akan dilepaskan pada sistem tenaga listrik ini adalah anjungan yang memiliki tingkat tegangan 13,8 kV. Jenis anjungan yang dimiliki oleh CNOOC SES Ltd adalah anjungan *monopod*. Anjungan *monopod* memiliki ukuran yang kecil sehingga tidak memungkinkan adanya operator yang tinggal dan mengawasi unjuk

kerja anjungan dan tidak memiliki *diesel engine* dengan daya aktif keluaran 125 kW yang dapat mensuplai kebutuhan penerangan dan motor kompresor. Hal ini dirasa cukup merepotkan nantinya apabila anjungan *monopod* dilepas untuk kebutuhan pemulihan frekuensi.

b. Permasalahan pasir

Beberapa anjungan yang dimiliki CNOOC SES Ltd. terletak pada area kilang yang berpasir. Pada saat pengasutan materi yang keluar dari sumur adalah pasir yang cukup banyak sehingga seiring berjalannya waktu dapat mengakibatkan kerusakan pada motor. Hal ini cukup merepotkan bila beban tersebut dipilih sebagai beban yang dilepas untuk pemulihan frekuensi. Sehingga dalam tahap pelepasan beban, anjungan yang memiliki permasalahan pasir tidak termasuk dalam beban yang dilepas untuk pemulihan frekuensi.

c. Sumber Air

Untuk memudahkan pengambilan minyak dari sumur-sumur yang ada dibutuhkan suatu zat yang dapat membuat minyak tersebut naik. Dalam hal ini zat yang dipakai adalah air. Ketika air dicampur dengan minyak, maka minyak akan berada di lapisan atas karena massa jenisnya yang lebih kecil dibandingkan dengan air. Dalam hal ini air yang digunakan untuk kepentingan tersebut dihasilkan oleh salah satu anjungan di unit bisnis Tengah yaitu Zelda-C. Agar tidak menghambat kinerja dari anjungan lain yang masih bisa bekerja (*on line system*), maka anjungan ini diharapkan terus bekerja ketika frekuensi turun.

Berikut ini adalah tabel yang menyajikan daftar anjungan yang tidak diperbolehkan untuk dilepas karena ketiga alasan yang telah disebutkan sebelumnya:

Tabel 4.9 Daftar Platform yang Tidak Boleh Dilepas

PLATFORM	ALASAN
Atti - A	Monopod
Farida - C	Masalah Pasir

Tabel 4.9 Daftar Platform yang Tidak Boleh Dilepas (lanjutan)

PLATFORM	ALASAN
Sundari - B	Masalah Pasir
S. Zelda A	Monopod
Theresia A	Monopod, Masalah Pasir
Zelda - A	Masalah Pasir
Zelda B	Masalah Pasir
Zelda C	Sumber Air
Zelda D	Masalah Pasir
Zelda E	Masalah Pasir
E Rama A	Monopod
Lita A	Monopod
NWA	Monopod
NWB	Monopod
Suratmi A	Monopod
SWA	Monopod

4.4 Beban yang Dipilih untuk Dilepas

Proses pelepasan beban yang terjadi dapat menyebabkan *islanding* pada sistem tenaga listrik di unit bisnis Utara, sehingga dalam pemilihan beban setiap tahap pelepasan beban merupakan kombinasi beban di unit bisnis area Selatan, Tengah dan Utara. Berikut ini adalah tahap-tahap pelepasan beban beserta pemilihan beban yang akan dilepas pada saat terjadi penurunan frekuensi:

Tabel 4.10 Skema Pelepasan Beban Frekuensi Rendah CNOOS SES Ltd.

Tahap ke-	Platform	kW	BOPD	kW/BOPD
1	Wanda – A	281	55	5,109090909
	Krisna – A	333	114	2,921052632
	Cinta – F	370	149	2,483221477
	Karmila – A	669	374	1,788770053
	Cinta – E	537	319	1,68338558
	Vita – A	1045	304	3,4375
	Widuri – G	1963,9	723	2,716320885
	2	Rama – C	182	87
Rama – F		153	97	1,577319588
Selatan – A		884	673	1,313521545
Nora – A		442	347	1,273775216
Cinta – H		813	690	1,17826087
NEIAC		2198,4	613	3,5862969
Widuri – F		206,4	95	2,172631579
Widuri – H		510,8	550	0,928727273
3	Sundari _ A	820	707	1,159830269

Tabel 4.10 Skema Pelepasan Beban Frekuensi Rendah CNOOS SES Ltd. (Lanjutan)

Tahap ke-	Platform	kW	BOPD	kW/BOPD
3	Rama – A	547	534	1,024344569
	Windri – A	975,6	963	1,013084112
4	Cinta – C	1488	1743	0,853700516
	Cinta – A	207	255	0,811764706
	Widuri – E	1517	1025	1,48
5	Rama – G	304	439	0,692482916
	Krisna – C	342	547	0,625228519
	Kartini – A	278	449	0,619153675
	Cinta D	695	1196	0,581103679
	Kitty – A	339	714	0,474789916
	Rama – B	324	688	0,470930233
	Cinta – G	446	989	0,450960566
6	Intan – B	4244,32	2013	2,108966716
	Farida – B	334	782	0,427109974
	Aida - A	3540	1344	2,633928571
	Indri - A	1594,9	1573	1,013922441
	7	Krisna – E	205	690
Titi – A		116	422	0,274881517
Widuri – C		3225,06	1834	1,758484188

4.5 Pengaturan Under Frequency Relay pada Perangkat Lunak ETAP

Untuk dapat mensimulasikan adanya gangguan generator lepas dari sistem dan melihat respon frekuensi dari sistem akibat gangguan tersebut pada skripsi ini digunakan perangkat lunak ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) dengan menggunakan fitur Analisa Stabilitas Transien (transient stability analysis). Divais yang digunakan untuk mendeteksi dan mengambil tindakan ketika terjadi penurunan frekuensi pada sistem tenaga listrik adalah rele frekuensi. Oleh sebab itu, dalam simulasi diperlukan beberapa pengaturan pada rele frekuensi. Pengaturan tersebut antara lain:

- a. Frekuensi *pick-up*
- b. Waktu tunda
- c. Pemutus tenaga yang terkait

Berikut ini adalah pengaturan rele frekuensi yang digunakan pada simulasi:

Tabel 4.11 Pengaturan Rele Frekuensi Pada Bus Platform Untuk Simulasi Pelepasan Beban

No	Platform	CB	Relay	% Hz	f (Hz)	Waktu Tunda	kW	SCBU Total	NBU Total
1	Krisna – A	CB 140	UFR 10	99.16	59,5	2,5	333	2190	3008,9
2	Cinta – F	CB 17	UFR 13			2,5	370		
3	Wanda – A	CB 427	UFR 4			2,5	281		
4	Karmila – A	CB440	UFR 23			2,5	669		
5	Cinta – E	CB 14	UFR 20			2,5	537		
6	Vita – A	CB 342	UFR 19			2,5	1045		
7	Widuri – G	CB377	UFR39			2,5	1963,9		
8	Rama – F	CB 436	UFR 8	98.83	59,3	0,1	153	2474	2915,6
9	Selatan – A	CB444	UFR33			0,1	884		
10	Nora – A	CB423	UFR22			0,1	442		
11	Rama – C	CB 38	UFR 5			0,1	182		
12	Cinta – H	CB445	UFR35			0,1	813		
13	NEIAC	CB460 CB332	UFR63			0,1	2198,4		
14	Widuri – F	CB374	UFR 7			0,1	206,4		
15	Widuri – H	CB313	UFR31			0,1	510,8		
16	Sundari _ A	CB143	UFR37	98.58	59,15	0,1	820	1367	975,6
17	Rama – A	CB30	UFR29			0,1	547		
18	Windri – A	CB448	UFR43			0,1	975,6		
19	Cinta – C	CB452 CB451	UFR53	98.33	59	0,1	1488	1695	1517
20	Cinta – A	CB 9	UFR 16			0,1	207		
21	Widuri – E	CB379	UFR45			0,1	1517		
22	Rama – G	CB442	UFR26	97,92	58,75	0,1	304	2728	4244,32
23	Krisna – C	CB137	UFR30			0,1	342		
24	Kartini – A	CB443	UFR28			0,1	278		
25	Cinta D	CB435	UFR48			0,1	695		
26	Kitty – A	CB446	UFR38			0,1	339		
27	Rama – B	CB35	UFR34			0,1	324		
28	Cinta – G	CB449	UFR44			0,1	446		
29	Intan – B	-	UFR56			0,1	4244,32		
30	Aida - A	CB384	UFR49	97,5	58,5	0,01	3540	334	5134,9
31	Farida – B	CB201	UFR41			0,01	334		
32	Indri - A	CB303	UFR51			0,01	1594,9		
33	Widuri – C	CB351	UFR55	97.25	58,35	0,01	3225,06	321	3225,06
34	Krisna – E	CB139	UFR36			0,01	205		
35	Titi – A	CB195	UFR25			0,01	116		

Untuk mengantisipasi kerusakan generator akibat terjadinya penurunan frekuensi drastis yang dapat menyebabkan pemadaman total, selain pemasangan rele frekuensi pada bus-bus 13,8 kV di anjungan, pada setiap bus generator dipasang rele frekuensi yang akan mengirimkan sinyal kepada pemutus tenaga di dekat

generator ketika frekuensi pada bus tersebut bernilai 57,6 Hz (96%). Berikut ini adalah pengaturan rele frekuensi pada bus generator di sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd.:

Tabel 4.12 Pengaturan Rele Frekuensi pada Bus Generator Untuk Simulasi Pelepasan Beban

No	Generator	CB	Relay	% Hz	Waktu Tunda
1.	G101A	CB49	FR11	96	0,01
2.	G101B	CB 51	FR18	96	0,01
3.	G101C	CB 59	FR18	96	0,01
4.	G4	CB 191	FR19	96	0,01
5.	G9	CB 192	FR19	96	0,01
6.	SFX GTG1	CB SFX11A-G1	FR15	96	0,01
7.	SFX GTG2	CB SFX11B-G2	FR16	96	0,01
8.	Gen 14	CB230	FR13	96	0,01
9.	GEN 21	CB235	FR14	96	0,01

BAB 5

SIMULASI DAN ANALISA

5.1 Hasil Simulasi Skenario Pelepasan Beban Dengan Rele Frekuensi

Pada skripsi ini dilakukan beberapa simulasi lepasnya generator untuk mengetahui respon dari sistem pelepasan beban yang telah dirancang sebelumnya. Ketika terjadi peristiwa lepasnya generator maka jumlah suplai daya aktif akan lebih kecil daripada jumlah daya aktif permintaan beban. Akibat dari peristiwa tersebut frekuensi sistem pun turun. Dengan dirancangnya sistem pelepasan beban akibat penurunan frekuensi pada bab sebelumnya, diharapkan frekuensi sistem akan cepat pulih setelah dilakukan pelepasan beban.

Simulasi lepasnya generator dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ETAP. Fitur yang digunakan untuk melakukan simulasi ini adalah analisis stabilitas transien (*transient stability analysis*). Pada fitur ini dapat dilihat perubahan perilaku beberapa komponen dalam sistem tenaga listrik sebelum dan sesudah terjadi gangguan, dalam hal ini gangguan yang dimaksud adalah generator lepas. Untuk dapat mengamati perubahan perilaku sistem tenaga listrik, setiap simulasi dijalankan selama 60 detik.

Pada setiap simulasi hal yang diamati adalah :

- a. Perubahan daya aktif setiap generator yang masih bekerja
- b. Perubahan frekuensi sistem tenaga listrik unit bisnis
- c. Besarnya beban yang dilepaskan untuk memulihkan frekuensi
- d. Durasi waktu pemulihan setelah gangguan terjadi

Frekuensi pulih dalam hal ini artinya frekuensi berada dalam rentang yang diperbolehkan bagi frekuensi nominal 60 Hz yaitu 59,5 – 60,5 Hz.

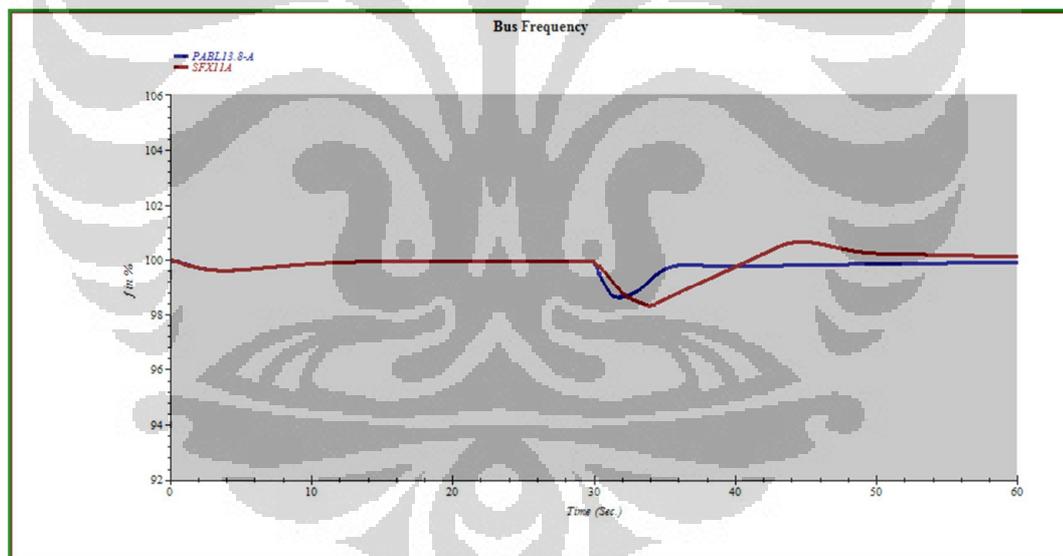
Berikut ini adalah beberapa skenario kombinasi generator lepas yang mengakibatkan penurunan frekuensi dan setelah dilakukan pelepasan beban frekuensi sistem berangsur-angsur pulih:

a. G101A Lepas

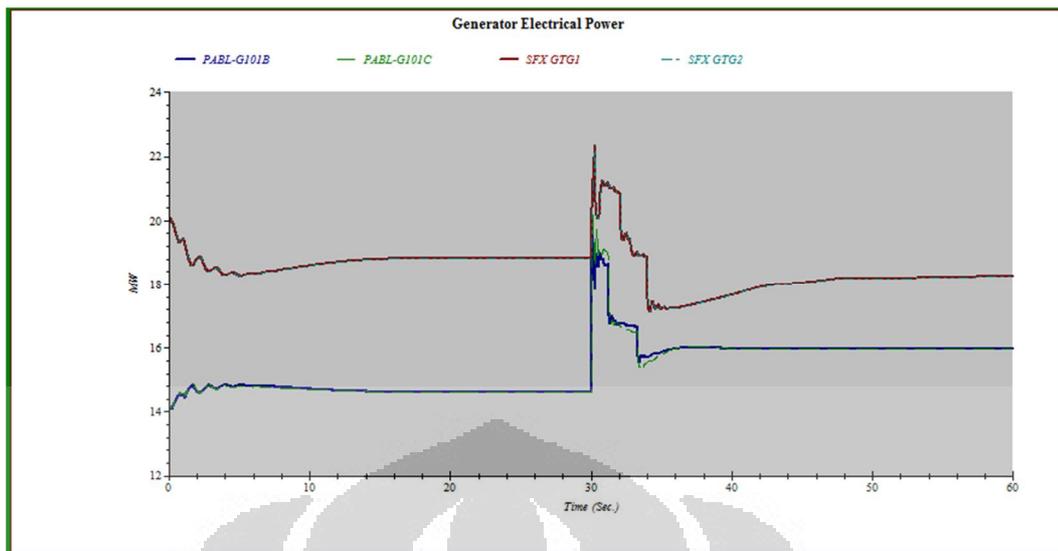
Pada skenario ini terdapat 1 unit generator lepas yaitu G101A, generator yang terletak di unit bisnis Selatan dan menghasilkan 14,82 MW sebelum gangguan terjadi. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.1 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G101A Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	83,17	74,78	4,664	6,900	ON	3,76	7,82



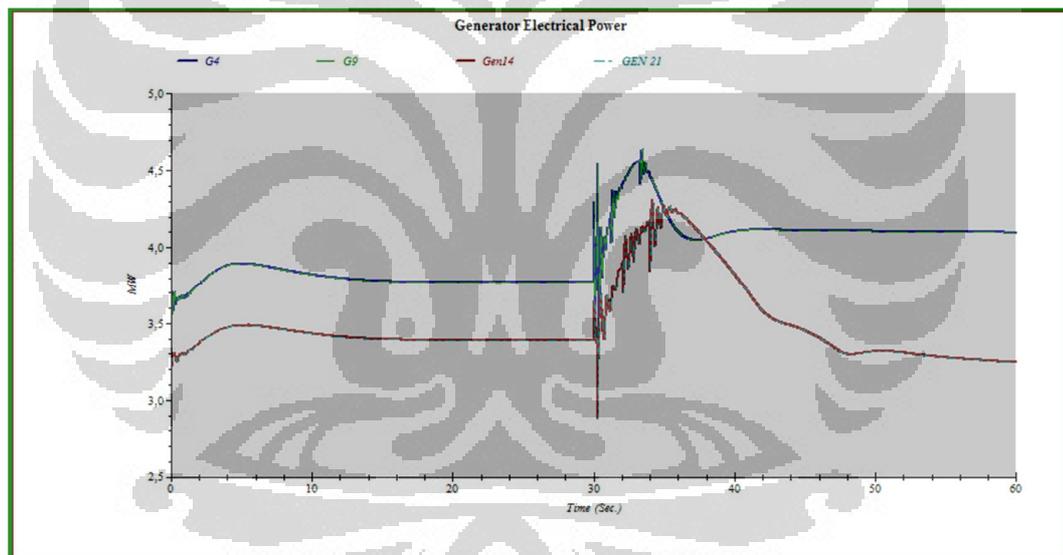
Gambar 5.1 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A Lepas



Gambar 5.2 Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A Lepas

Dalam simulasi *transient stability analysis* pada 25 detik pertama sistem belum mencapai kestabilan. Daya aktif yang dihasilkan generator sesaat sebelum gangguan adalah 95,84 MW dan beban yang harus disuplai tanpa memperhitungkan rugi-rugi daya adalah 86,34 MW. Daya aktif yang disuplai oleh 3 unit generator di Pabelokan sesaat sebelum terjadi gangguan adalah 14,82 MW. Ketika terjadi gangguan G101A lepas, maka daya aktif yang harus disuplai oleh G101B dan G101C meningkat hingga lebih dari 20 MW karena ketiga generator tersebut bekerja dengan mode *isochronous*. Peningkatan daya aktif kedua generator tersebut menyebabkan frekuensi sistem mulai turun karena daya aktif yang dihasilkan melebihi *rating* kerja generator. Gangguan ini membuat suplai daya aktif untuk unit bisnis Utara melalui kabel C-85 (incoming Kara) berangsur-angsur turun yang pada keadaan normal mencapai 5,38 MW. Hal ini menyebabkan pemutus tenaga bekerja karena terjadi *under power* (< 1 MW) pada kabel tersebut. Frekuensi sistem pada unit bisnis selatan dan tengah turun hingga mencapai 59,17 Hz. Sesuai dengan perancangan yang telah dibuat sebelumnya, ketika frekuensi turun hingga antara 59,15 Hz – 59,3 Hz maka pelepasan beban terjadi hingga tahap kedua yaitu melepaskan beban hingga 4,664 MW untuk unit bisnis Selatan dan Tengah. Setelah pelepasan beban terjadi, frekuensi memasuki nilai aman pada unit bisnis Selatan dan Tengah 3,76 detik

setelah gangguan. Karena bekerjanya pemutus tenaga pada kabel C-85 yang menghubungkan unit bisnis Selatan dan Tengah dengan unit bisnis Utara, maka unit bisnis Utara kehilangan suplai daya aktif sekitar 5,38 MW. Hal tersebut membuat daya aktif yang disuplai generator di Seafox meningkat sesaat hingga mencapai lebih dari 22 MW. Sebagai respon dari peristiwa tersebut, frekuensi sistem pada unit bisnis Utara turun hingga 59,04 Hz karena generator diatur *droop* 19 MW. Sesuai dengan perancangan sistem pelepasan beban yang telah disusun sebelumnya, ketika frekuensi sistem turun hingga 59 – 59,15 Hz maka pelepasan beban yang terjadi hingga 3 tahap dan beban yang dilepaskan mencapai 6,900 MW untuk unit bisnis Utara CNOOC SES Ltd. Setelah pelepasan beban terjadi, frekuensi memasuki nilai aman pada unit bisnis Utara 7,82 detik setelah gangguan.



Gambar 5.3 Perubahan Daya Aktif G4, G9, gen 14 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A Lepas

Sesuai pengaturan yang dilakukan pada G4 dan G9 seharusnya kedua generator tersebut menghasilkan daya 3,5 MW pada keadaan normal. Namun, pada skenario ini daya yang dihasilkan sebelum gangguan mencapai 3,77 MW. Sesaat setelah gangguan terjadi osilasi daya aktif dan ketika sistem kembali stabil setelah terjadi pelepasan beban, daya yang dihasilkan generator mencapai 4,1 MW. Ketidaksesuaian daya aktif yang dihasilkan generator ini terjadi akibat nilai

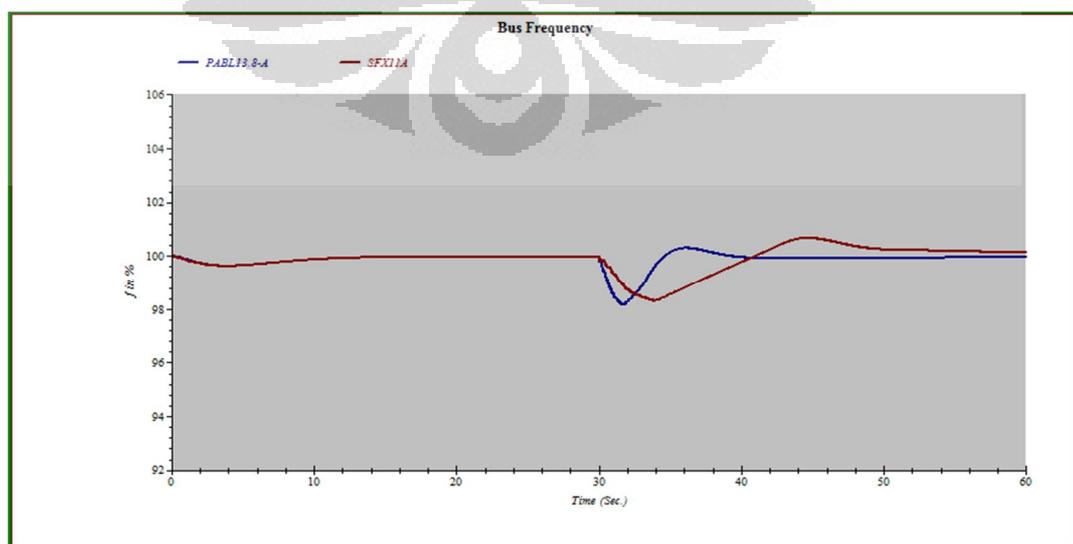
konstanta inersia generator yang relatif kecil, sehingga bila terjadi gangguan pada sistem maka generator ini akan lebih cepat mengalami keadaan abnormal. Sedangkan Gen 14 dan GEN 21 diatur untuk dapat menghasilkan daya 3 MW. Pada kondisi transien, kedua generator tersebut mampu menghasilkan daya 3,39 MW sebelum gangguan. Setelah terjadi gangguan, terjadi osilasi pada kedua generator tersebut dan setelah kondisi stabil, suplai kedua generator kembali normal yaitu 3 MW.

b. G101A dan G4 lepas

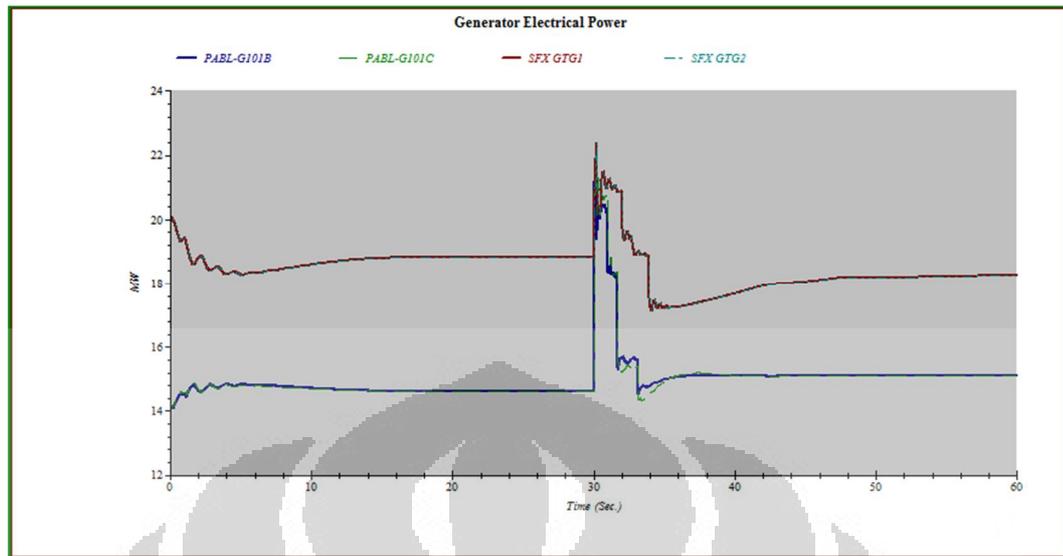
Pada skenario ini terdapat 2 unit generator lepas yaitu G101A yang terletak pada unit bisnis Selatan dan G4, generator pada unit bisnis Tengah. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.2 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G101A dan G4 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	76,56	71,71	7,726	6,900	ON	3,36	7,4



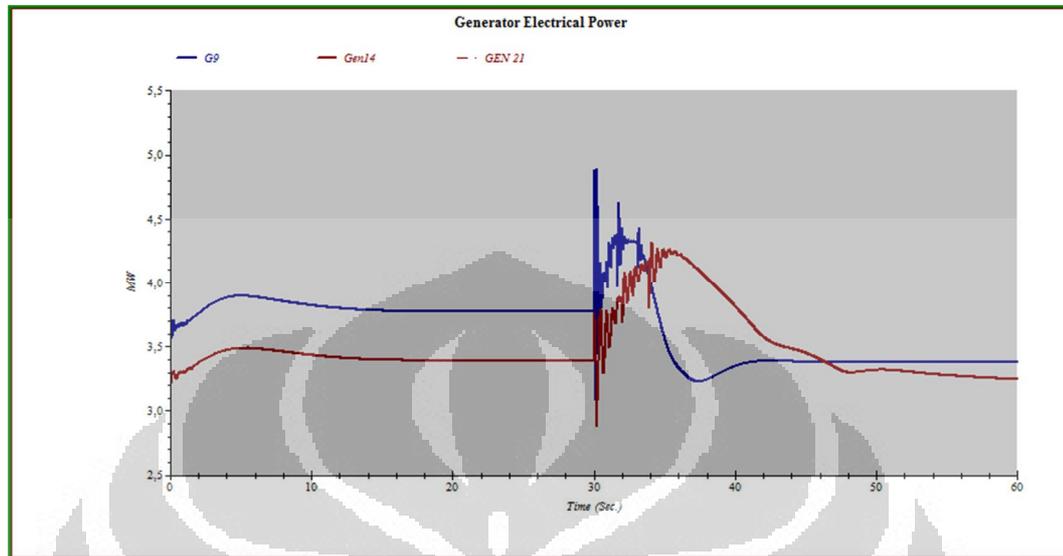
Gambar 5.4 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan G4 Lepas



Gambar 5.5 Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan G4 Lepas

Pada kondisi stabil, masing-masing generator yang lepas menghasilkan daya aktif sekitar 14,82 MW dan 3,77 MW. Ketika G101A dan G4 lepas, sesuai dengan yang diharapkan bahwa daya aktif yang harus dihasilkan oleh kedua generator tersebut dialihkan kepada G101B dan G101C. Hal ini tidak berlaku pada G9 karena G9 bekerja pada mode *droop* (daya aktif keluarannya tetap dan tidak mengikuti fluktuasi beban). Daya aktif yang diproduksi oleh G101B dan G101C meningkat tajam sesaat hingga mencapai lebih dari 20 MW, hal ini menyebabkan frekuensi pun menurun. Jika dibandingkan dengan skenario sebelumnya, tren penurunan frekuensi pada skenario ini turun lebih tajam. Hal ini disebabkan oleh suplai daya aktif yang hilang lebih besar sehingga penurunan frekuensi per detik lebih besar. Penurunan frekuensi yang terjadi mencapai 58,9 Hz. Oleh sebab itu, sesuai dengan rancangan sistem pelepasan beban akibat penurunan frekuensi, ketika frekuensi turun antara 58,75 - 59 Hz, maka besar beban yang dilepas adalah 7,726 MW untuk unit bisnis Selatan dan Tengah. Setelah dilakukan pelepasan beban, frekuensi dapat pulih (mencapai 59,5 Hz) 3,36 detik setelah G101A dan G4 lepas. Pada kondisi ini, suplai daya aktif dari pembangkit Pabelokan menuju unit bisnis Utara pun semakin lama semakin turun sehingga pemutus tenaga pada kabel C-85 bekerja karena *under power*. Sehingga unit bisnis Utara mengalami

kehilangan suplai daya aktif sekitar 5,38 MW. Kondisi yang dialami unit bisnis Utara pada skenario ini sama dengan kondisi pada skenario sebelumnya.



Gambar 5.6 Perubahan Daya Aktif G9, gen 14 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan G4 Lepas

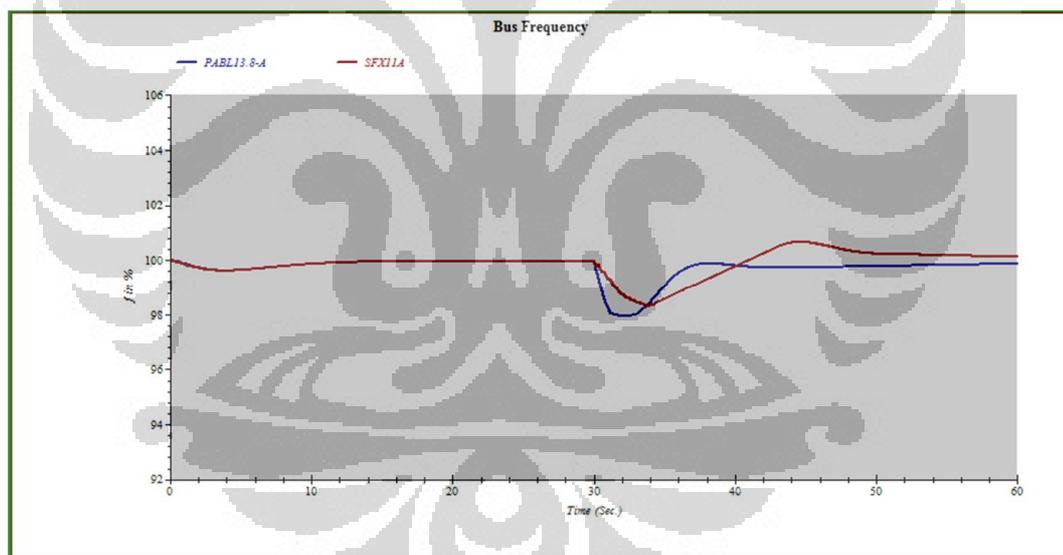
Kondisi perubahan suplai daya aktif dari G9, Gen 14 dan GEN 21 tidak berbeda jauh dengan skenario sebelumnya. Perbedaan hanya tampak pada besarnya daya aktif yang dihasilkan G9 pada kondisi stabil setelah gangguan yaitu mencapai 3,5 MW. Hal ini sesuai dengan pengaturan yang diberikan kepada generator tersebut.

c. G101A, G4 dan G9 lepas

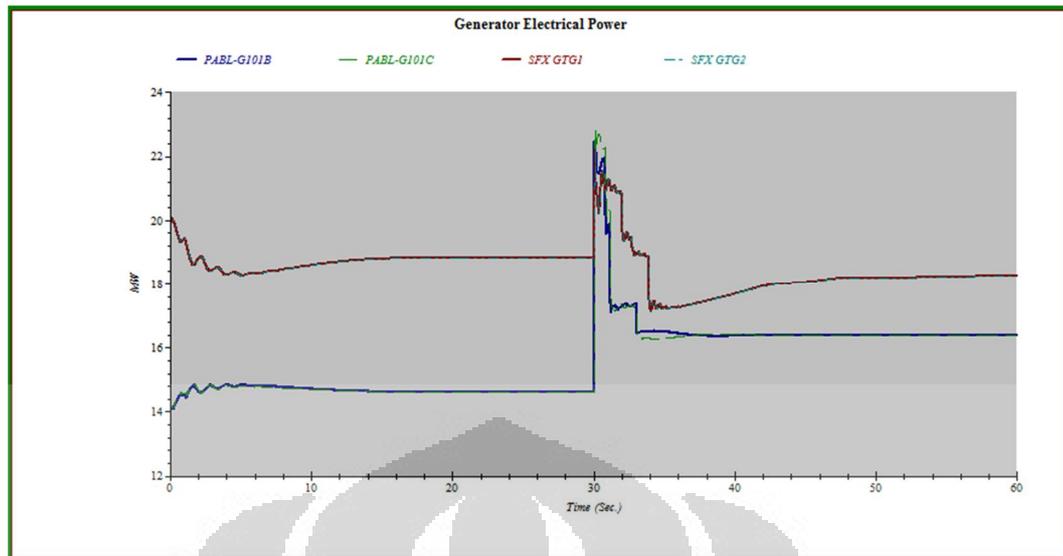
Pada skenario ini terdapat 3 unit generator lepas yaitu G101A yang terletak di unit bisnis Selatan, G4 dan G9, 2 unit generator di unit bisnis Tengah. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.3 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G101A , G4 dan G9 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	75,3	71,71	7,726	6,900	ON	5,15	7,35

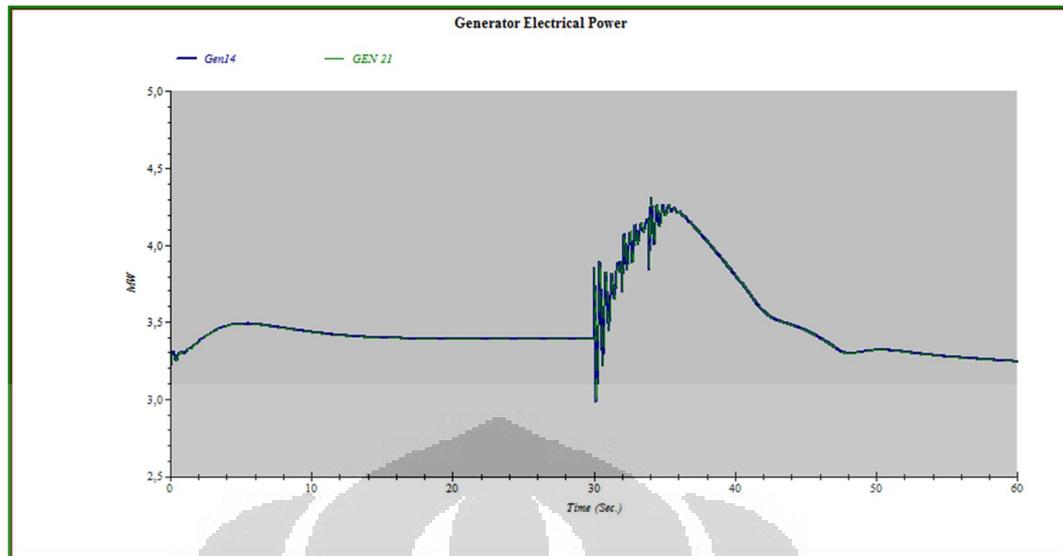


Gambar 5.7 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan G9 Lepas



Gambar 5.8 Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan G9 Lepas

Lepasnya ketiga unit generator tersebut membuat sistem tenaga listrik kehilangan daya aktif sekitar 21 MW. Hal ini menyebabkan bekerjanya pemutus tenaga di kabel C-85 karena *under power*. Sistem terbagi menjadi 2 pulau (*islanding*) yaitu wilayah Selatan Tengah dan wilayah Utara. Pada unit bisnis Selatan, suplai daya aktif yang dihasilkan oleh 2 generator yang masih aktif di Pabelokan meningkat hingga lebih dari 22 MW dan frekuensi sistem unit bisnis Selatan Tengah turun hingga 58,77 Hz. Sehingga untuk dapat memulihkan frekuensi dilakukan pelepasan beban sampai tahap kelima yaitu 7,726 MW. Setelah pelepasan beban dilakukan, frekuensi sistem kembali pulih 5,15 detik setelah gangguan. Sedangkan kondisi sistem tenaga listrik unit bisnis Utara pada skenario ini masih sama seperti 2 skenario sebelumnya dan frekuensi pulih 7,35 detik setelah gangguan.



Gambar 5.9 Perubahan Daya Aktif Gen 14 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan G9 Lepas

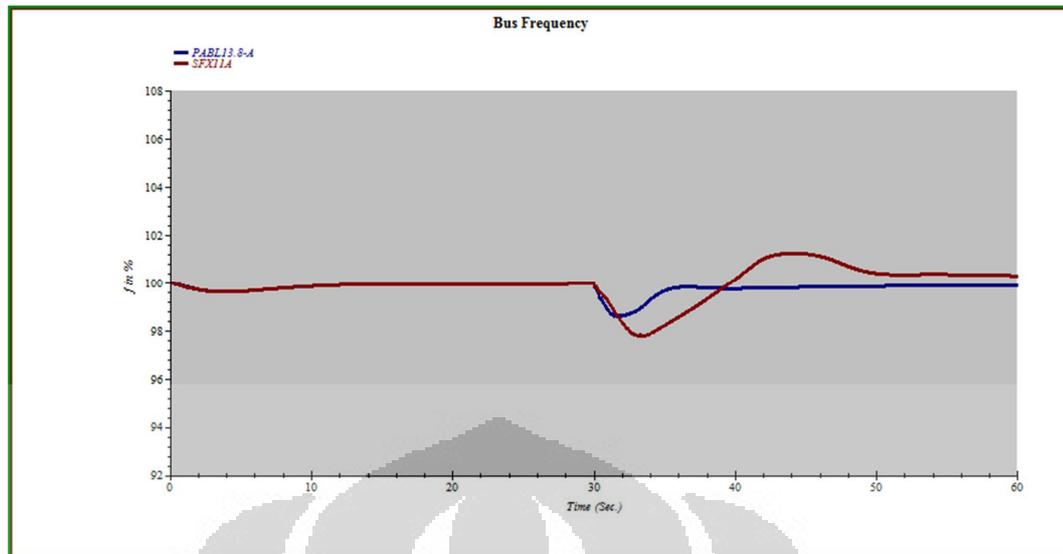
Kondisi perubahan daya aktif dari Gen 14 dan GEN 21 sebelum dan sesudah gangguan sama seperti 2 skenario sebelumnya yaitu sesaat sebelum gangguan daya yang mampu dihasilkan oleh kedua generator tersebut adalah 3,39 MW dan setelah gangguan daya aktif yang dihasilkan 3 MW (sesuai dengan pengaturan yang dipakai yaitu *droop* 3 MW)

d. G101A dan Gen 14 Lepas

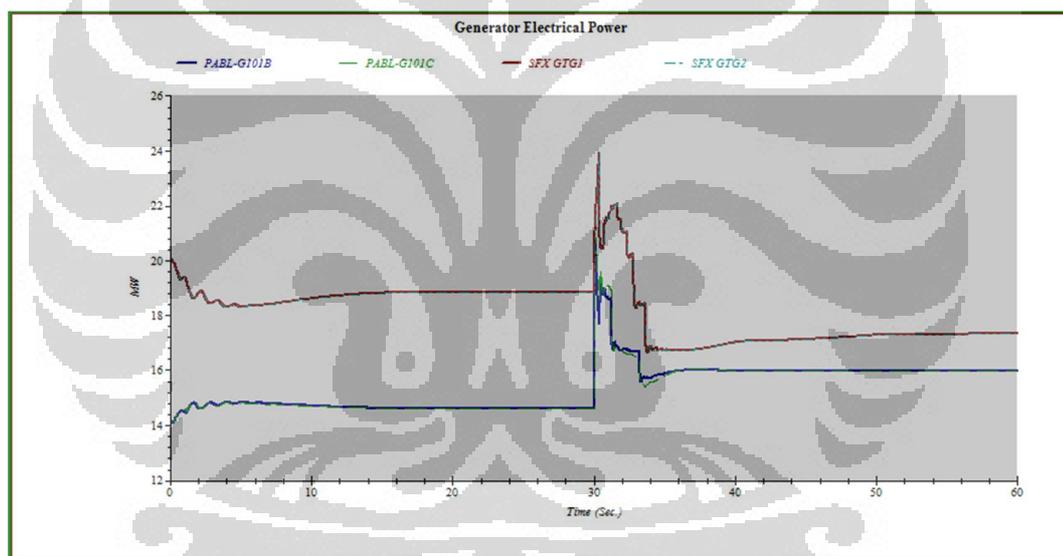
Pada skenario ini terdapat 2 unit generator lepas yaitu G101A yang terletak di unit bisnis Selatan dan Gen 14 terletak di unit bisnis Utara. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.4 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G101A dan Gen 14 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	77,88	69,01	4,664	12,661	ON	3,7	7,55



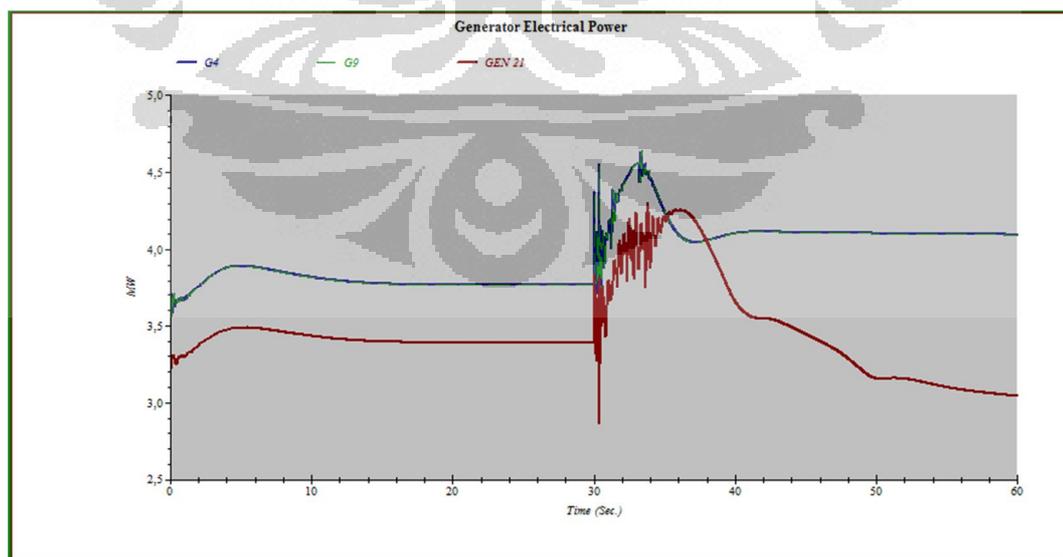
Gambar 5.10 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan Gen 14 Lepas



Gambar 5.11 Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan Gen 14 Lepas

Lepasnya kedua generator pada skenario ini membuat sistem tenaga listrik kehilangan daya aktif 14,82 MW (G101A) dan 3 MW (Gen 14). Hal ini menyebabkan terjadinya penurunan suplai daya dari pembangkit area Selatan ke unit bisnis area Utara yang memicu bekerjanya pemutus tenaga di kabel C-85 (*under power*). Lepasnya generator G101A dan Gen 14 menyebabkan meningkatnya daya aktif yang dihasilkan G101B dan G101C hingga melebihi 20 MW. Ketika pemutus tenaga pada C-85 bekerja, beban yang ditanggung oleh

pembangkit di area Selatan berkurang hingga 5,38 MW. Walaupun berkurang hingga 5,38 MW, generator masih tetap menghasilkan daya aktif lebih dari 20 MW (*rating*) sehingga menyebabkan terjadinya penurunan frekuensi hingga 59,17 Hz pada unit bisnis Selatan Tengah. Sesuai dengan perancangan sistem pelepasan beban yang diterapkan pada sistem ini maka untuk memulihkan frekuensi dilakukan pelepasan beban hingga tahap kedua yaitu 4,664 MW. Setelah pelepasan beban dilakukan maka frekuensi pulih 3,7 detik setelah gangguan. Sedangkan unit bisnis Utara kehilangan suplai daya aktif sekitar 5,38 MW dari lepasnya kabel C-85 dan 3,39 MW dari lepasnya Gen 14. Hal ini menyebabkan penurunan frekuensi yang cukup signifikan hingga 58,68 Hz. Sesuai dengan rancangan sistem pelepasan beban yang diterapkan pada sistem ini, maka untuk memulihkan frekuensi unit bisnis Utara dibutuhkan 5 tahap pelepasan beban yaitu 12,661 MW. Setelah pelepasan beban dilakukan maka frekuensi pulih 7,55 detik setelah gangguan. Akibat dari besarnya beban yang dilepaskan, untuk memenuhi kebutuhan daya unit bisnis Utara, 2 pembangkit yang dioperasikan di Seafox tidak lagi menghasilkan daya aktif *droop* 19 MW tetapi bekerja pada *droop* 17 MW. Pada kenyataannya perubahan pengaturan *droop* ini dilakukan secara manual oleh operator. Hal ini terjadi untuk menghindari terjadinya kelebihan suplai daya yang dapat memicu terjadinya *over frequency*.



Gambar 5.12 Perubahan Daya Aktif G4, G9 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A dan Gen 14 Lepas

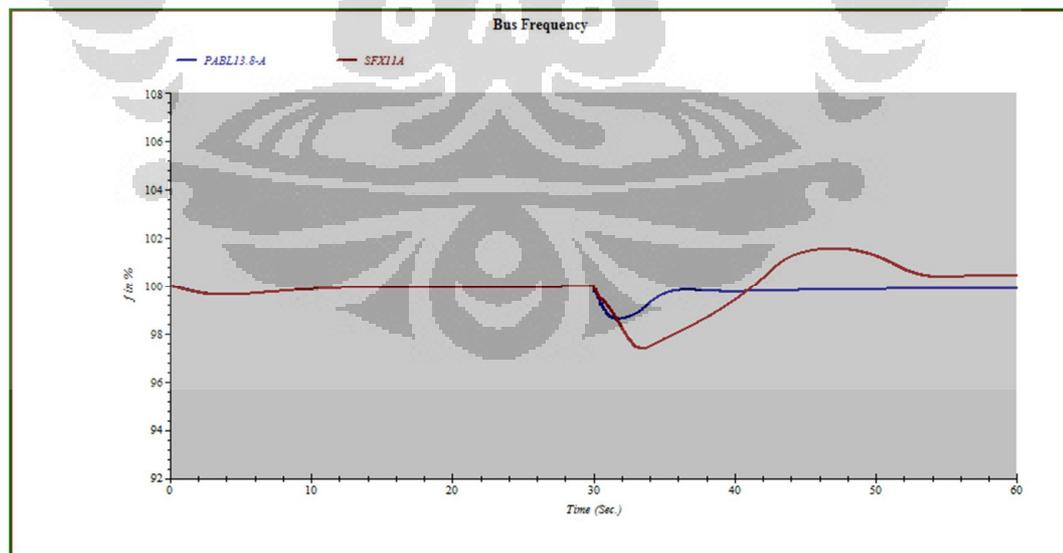
Perubahan daya aktif yang dihasilkan oleh G4, G9 dan GEN 21 sebelum dan sesudah gangguan sama seperti yang dialami oleh skenario pertama yaitu ketika G101A lepas.

e. G101A, Gen 14 dan GEN 21 Lepas

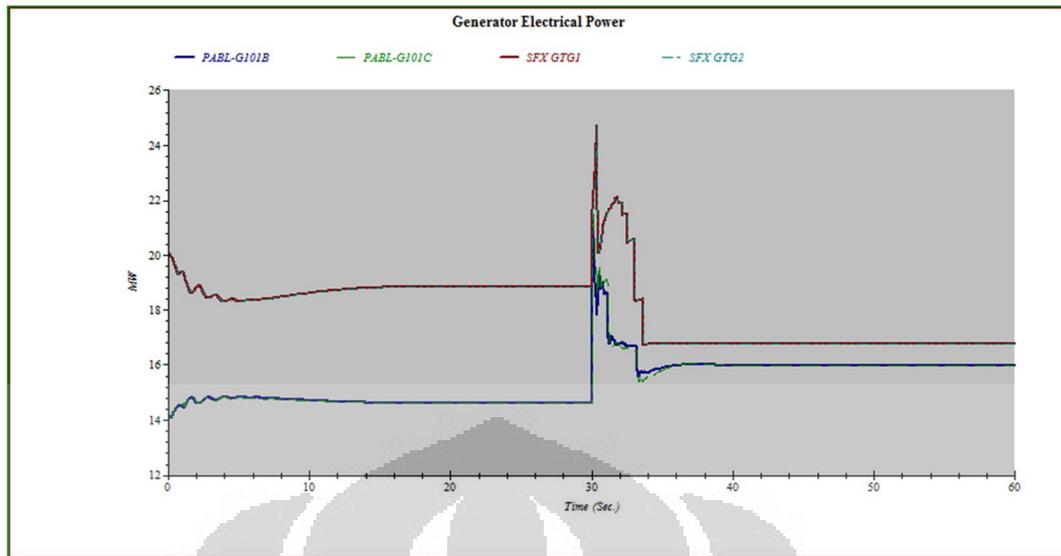
Pada skenario ini terdapat 3 unit generator lepas yaitu G101A, GEN 21 dan Gen 14. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.5 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G101A , Gen 14 dan GEN 21 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	73,72	63,88	4,664	17,796	ON	3,69	9,31



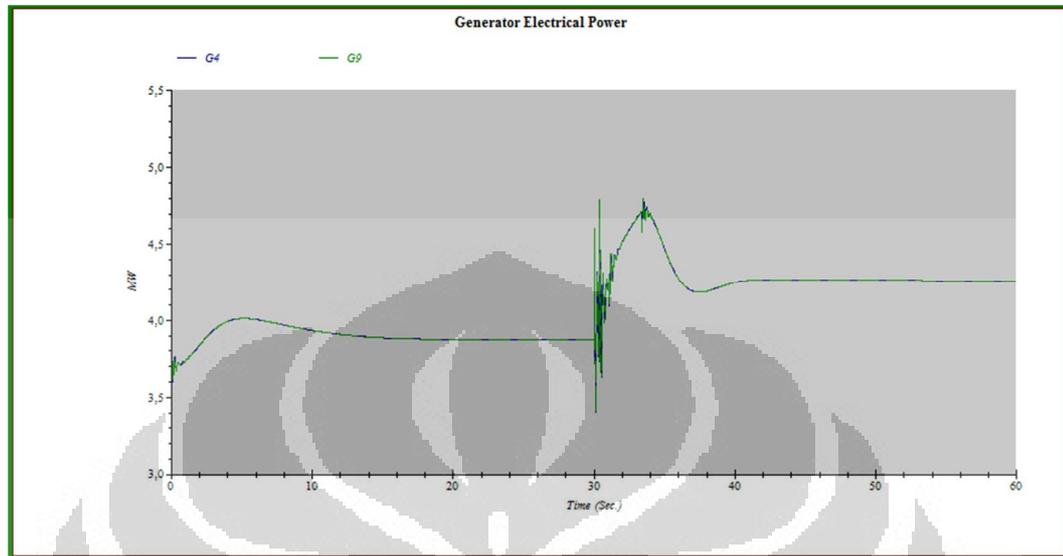
Gambar 5.13 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, Gen 14 dan GEN 21 Lepas



Gambar 5.14 Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, Gen 14 dan GEN 21 Lepas

Lepasnya G101A (14,82 MW) dan 2 generator di Widuri-P (6 MW) mengakibatkan meningkatnya suplai daya aktif G101B dan G101C karena kedua generator tersebut bekerja pada mode *isochronous*. Peningkatan daya aktif yang terjadi hingga 21 MW. Pada kondisi ini pemutus tenaga pada C-85 bekerja karena *under power*, suplai daya aktif dari pembangkit Pabelokan semakin lama semakin turun jumlahnya yang melewati C-85. Ketika pemutus tenaga pada C-85 bekerja, beban yang harus disuplai pembangkit di Pabelokan berkurang sekitar 5,38 MW. Namun, penurunan frekuensi masih terjadi karena daya aktif yang harus disuplai oleh generator di Pabelokan masih melebihi *rating* kerja generator. Penurunan frekuensi yang terjadi di unit bisnis Selatan Tengah hingga 59,17 Hz sehingga pelepasan beban yang terjadi ada 2 tahap yaitu 4,664 MW. Setelah pelepasan beban dilakukan, frekuensi pulih 3,69 detik setelah gangguan. Pada unit bisnis Utara terjadi kekurangan daya aktif 2 x 3 MW dan 5,38 MW. Hal ini mengakibatkan meningkatnya suplai daya aktif yang dihasilkan pembangkit di Seafox sesaat karena sifat dari generator yaitu *droop*. Karena suplai daya aktif jauh lebih kecil daripada beban yang harus disuplai, frekuensi sistem di unit bisnis Utara menurun tajam hingga 58,42 Hz. Sesuai dengan perancangan sistem pelepasan beban, untuk dapat memulihkan frekuensi, dilakukan pelepasan beban 6

tahap oleh unit bisnis Utara yaitu 17,796 MW. Setelah pelepasan beban dilakukan, frekuensi pulih 9,31 detik setelah gangguan.



Gambar 5.15 Perubahan Daya Aktif G4 dan G9 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

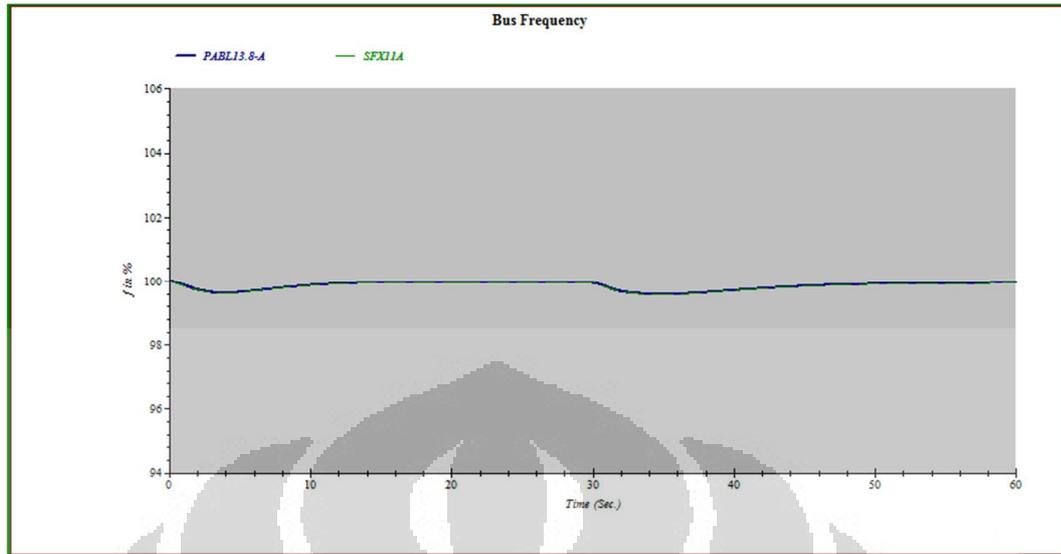
Perubahan yang terjadi pada suplai daya yang dihasilkan oleh G4 dan G9 sama dengan simulasi skenario pertama yaitu ketika G101A lepas.

f. G4 Lepas

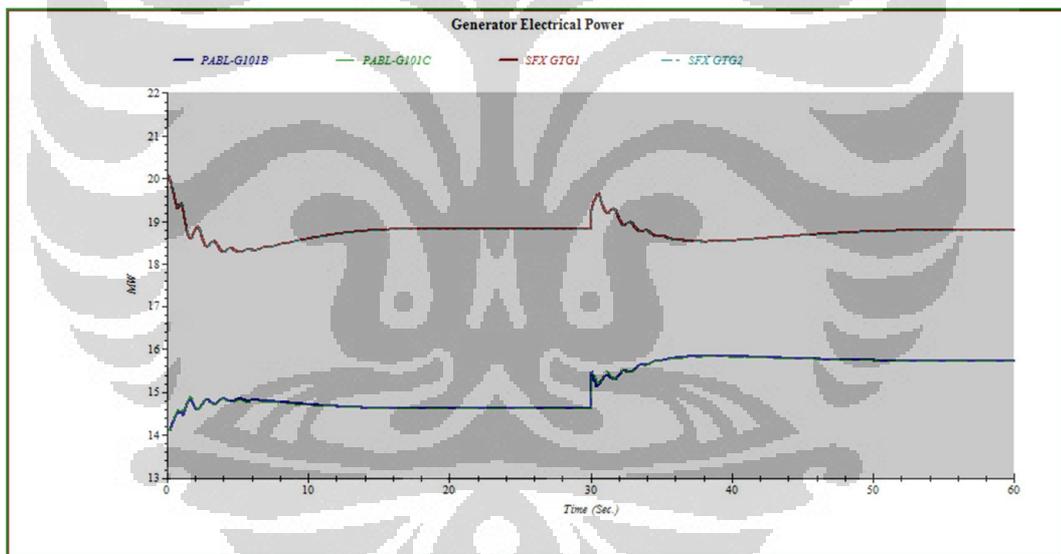
Pada skenario ini terdapat 1 unit generator lepas yaitu G4. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.6 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G4 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	95,51	86,34	0	0	OFF	-	-



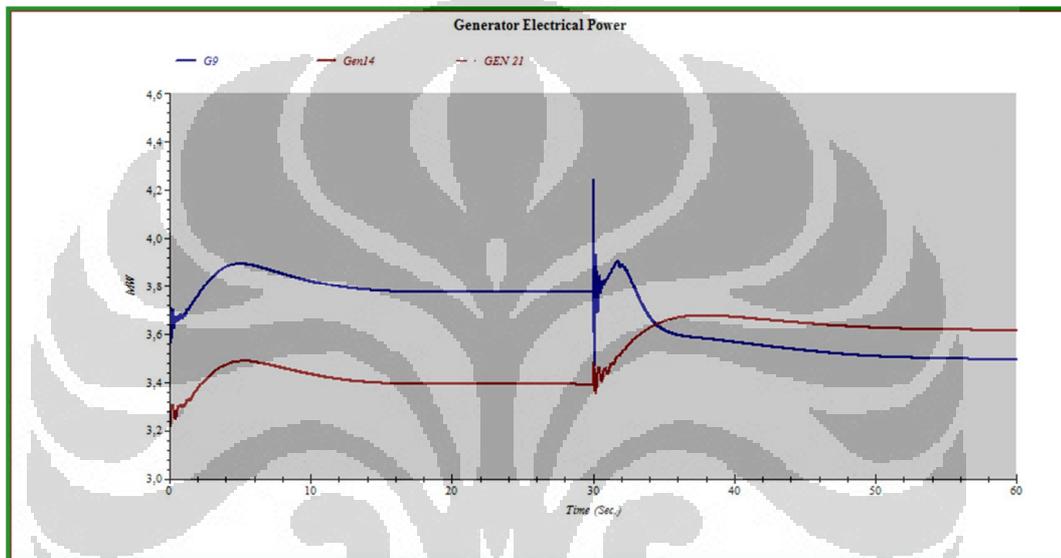
Gambar 5.16 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4 Lepas



Gambar 5.17 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 Lepas

Pada skenario ini terdapat 1 unit generator lepas yang menghasilkan daya aktif 3,5 MW di unit bisnis Tengah. Sesuai dengan sifat G101A, G101B dan G101C yang bekerja dengan mode *isochronous*, beban yang harus disuplai oleh G4 dialihkan kepada ketiga generator tersebut. Suplai daya aktif yang dihasilkan oleh ketiga generator tersebut meningkat namun masih dalam batas *rating* kerjanya sehingga peningkatan ini tidak menyebabkan penurunan frekuensi hingga 59,5 Hz. Artinya,

pada skenario ini tidak terjadi pelepasan beban untuk pemulihan frekuensi. Pada skenario ini pemutus tenaga pada C-85 tidak bekerja, sehingga unit bisnis area Utara tidak kekurangan suplai dan tidak terjadi penurunan frekuensi. Lonjakan daya aktif sesaat yang dihasilkan oleh pembangkit di Seafox adalah respon generator ketika G4 lepas dari sistem. Setelah sistem kembali stabil, daya aktif yang dihasilkan oleh kedua generator tersebut *droop* 19 MW. Hal ini sesuai dengan mode kerja yang diterapkan pada kedua generator tersebut.



Gambar 5.18 Perubahan Daya Aktif Gen 14, G9 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 Lepas

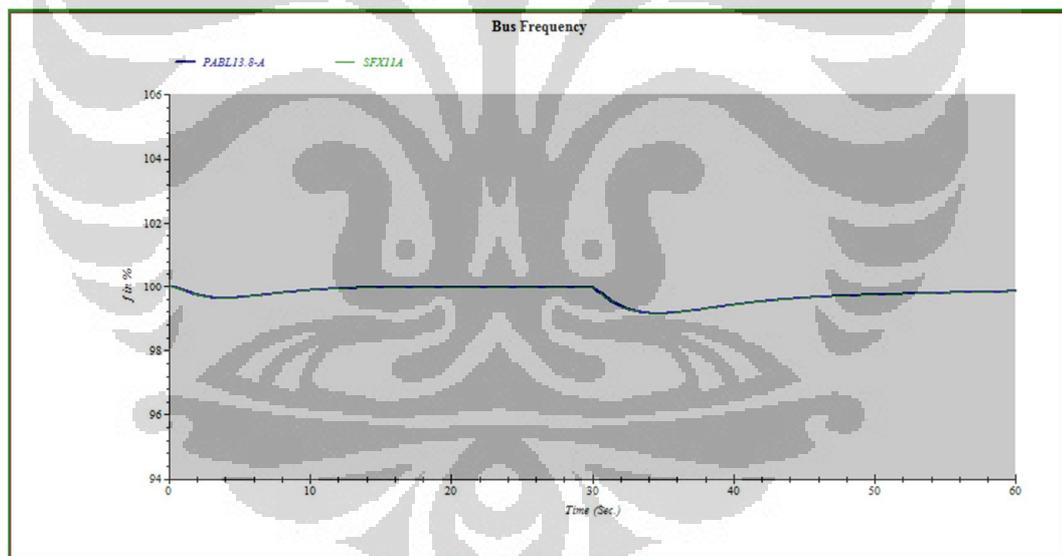
Pada skenario ini, daya aktif yang dihasilkan oleh G9 sebelum gangguan mencapai 3,77 MW dan setelah gangguan daya aktif yang dihasilkan adalah 3,5 MW. Sedangkan pada Gen 14 dan GEN 21, daya aktif yang dihasilkan sebelum gangguan mencapai 3,39 MW dan setelah gangguan, daya aktif yang dihasilkan meningkat menjadi 3,7 MW. Hal ini terjadi karena suplai daya aktif dari pembangkit yang terletak di unit bisnis Selatan sedikit menurun akibat adanya G4 lepas sehingga untuk tetap mensuplai kebutuhan beban unit bisnis Utara, Gen 14 dan GEN 21 meningkat produksi dayanya. Peningkatan pada Gen 14 dan GEN 21 disebabkan oleh konstanta inersia yang dimiliki oleh kedua generator tersebut bila dibandingkan dengan 2 generator di Seafox. Sehingga daya keluaran generator di Seafox cenderung lebih stabil.

g. G4 dan G9 Lepas

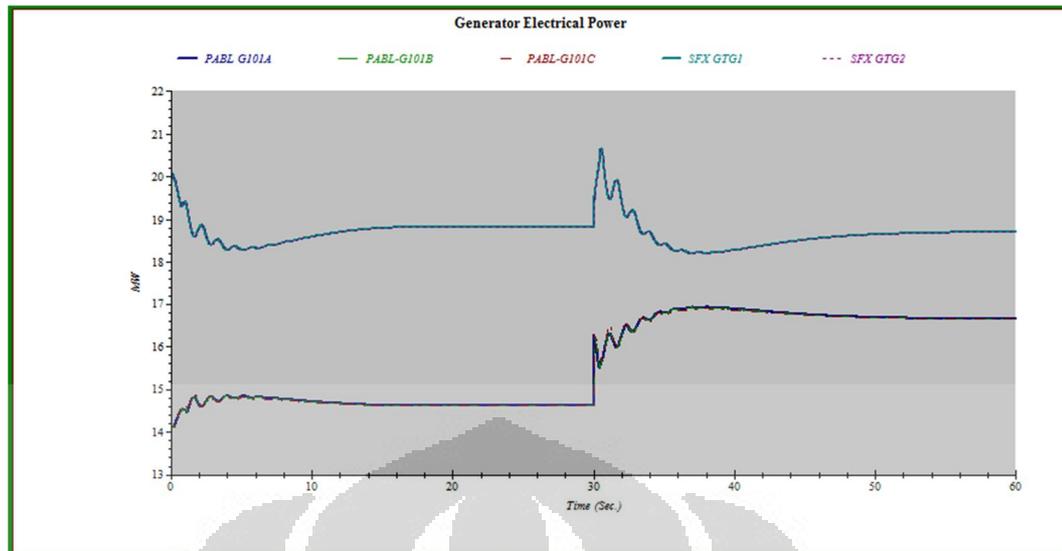
Pada skenario ini terdapat 2 unit generator lepas yaitu G4 dan G9, 2 unit generator di unit bisnis Tengah. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.7 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G4 dan G9 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	94,97	86,34	-	-	OFF	-	-

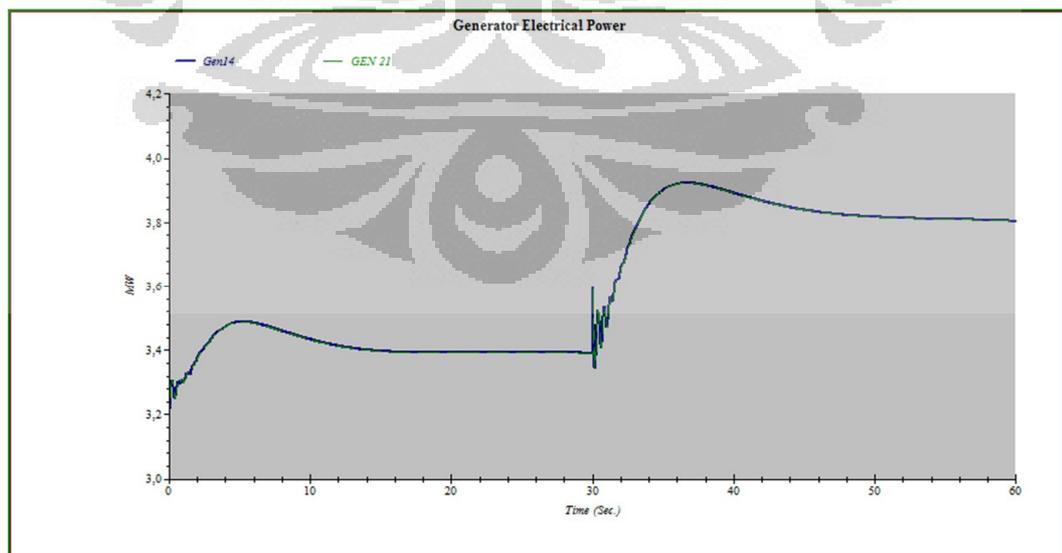


Gambar 5.19 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan G9 Lepas



Gambar 5.20 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan G9 Lepas

Ketika terjadi gangguan, G101A, G101B dan G101C yang bekerja dengan mode *isochronous* mengalami peningkatan kemampuan suplai daya aktif karena beban yang harus disuplai oleh G4 dan G9 (± 7 MW) dialihkan kepada ketiga generator tersebut. Peningkatan suplai daya aktif tersebut tidak menyebabkan adanya penurunan frekuensi yang signifikan. Selain itu, pemutus tenaga pada C-85 tidak bekerja, sehingga unit bisnis area Utara tidak kekurangan suplai dan tidak terjadi penurunan frekuensi.



Gambar 5.21 Perubahan Daya Aktif Gen 14 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan G9 Lepas

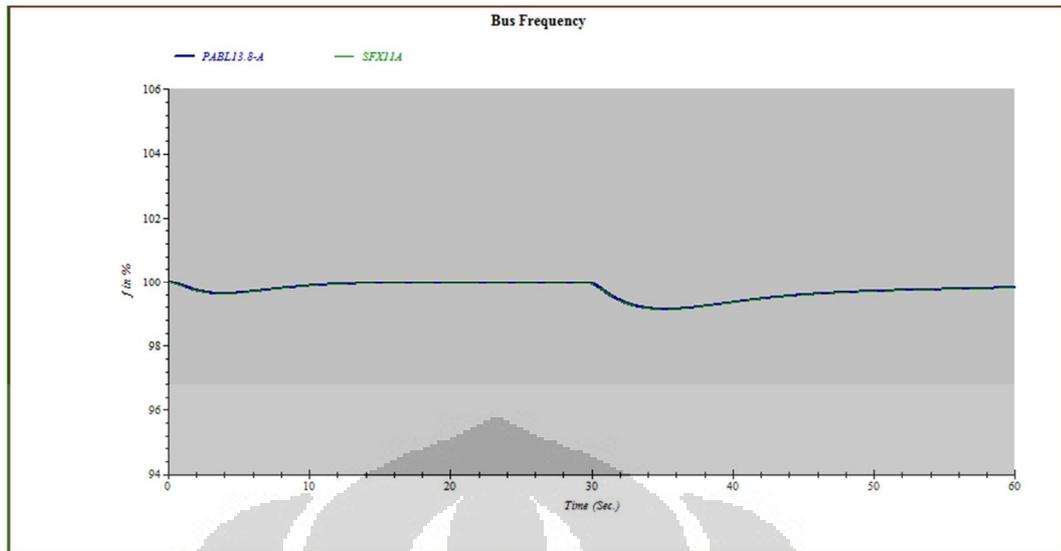
Perubahan suplai daya aktif yang dihasilkan oleh Gen 14 dan GEN 21 sedikit berbeda dengan skenario sebelumnya. Sesaat sebelum terjadi gangguan, daya aktif yang dihasilkan oleh kedua generator tersebut mencapai 3,39 MW. Setelah terjadi gangguan, daya aktif yang dihasilkan oleh kedua generator tersebut menjadi 3,8 MW. Jika dibandingkan dengan 2 unit generator di Seafox, konstanta inersia kedua generator tersebut cukup kecil. Sehingga jika terjadi gangguan pada sistem di unit bisnis Utara generator yang akan bereaksi cukup signifikan adalah Gen 14 dan GEN 21. Akibat lepasnya 2 unit generator di Zelda-P, terjadi sedikit penurunan suplai yang melewati C-85. Untuk mengatasi hal tersebut, maka Gen 14 dan GEN 21 bereaksi meningkatkan suplai daya aktifnya untuk menutupi kekurangan tersebut.

h. G4 dan Gen 14 Lepas

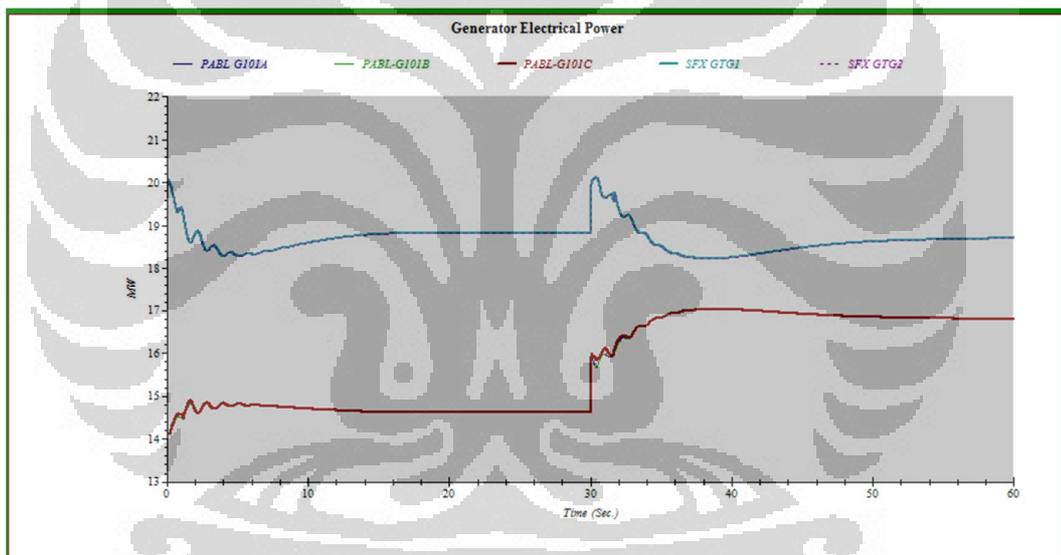
Pada skenario ini terdapat 2 unit generator lepas yaitu G4 dan Gen 14. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.8 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G4 dan Gen 14 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	95,4	86,34	-	-	OFF	-	-

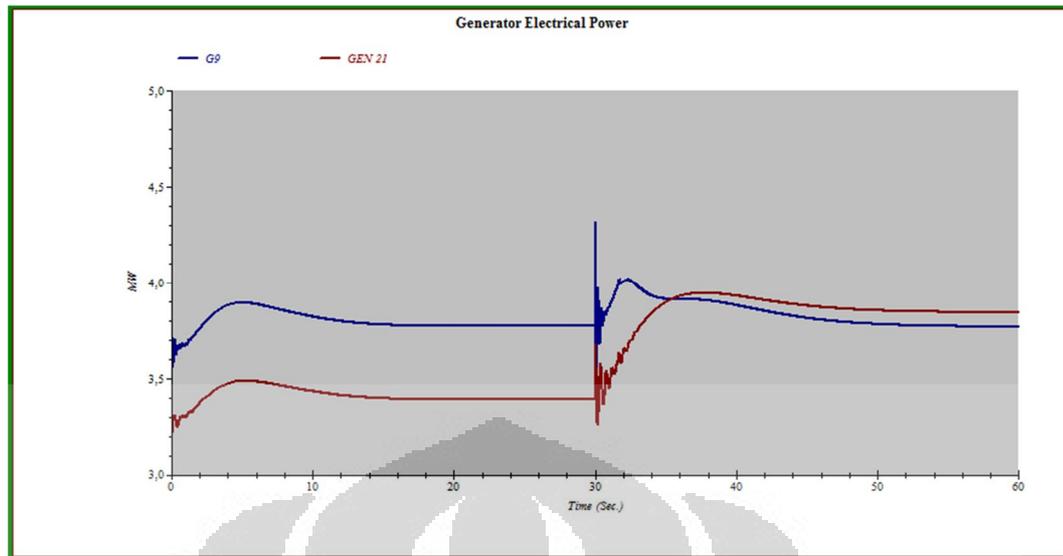


Gambar 5.22 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan Gen 14 Lepas



Gambar 5.23 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan Gen 14 Lepas

Gangguan yang diberikan pada skenario ini adalah 2 unit generator lepas yaitu G4 (3,5 MW) yang terletak di Zelda-P dan Gen 14 (3 MW) di Widuri-P. Pelepasan beban akibat frekuensi rendah tidak terjadi pada kombinasi generator lepas tersebut karena G101A, G101B dan G101C mampu memenuhi kekurangan daya aktif akibat lepasnya ketiga generator tersebut tanpa melebihi *rating* kerja. Pada skenario ini pemutus tenaga pada C-85 tidak bekerja, sehingga unit bisnis area Utara tidak kekurangan suplai dan tidak terjadi penurunan frekuensi.



Gambar 5.24 Perubahan Daya Aktif G9 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G4 dan Gen 14 Lepas

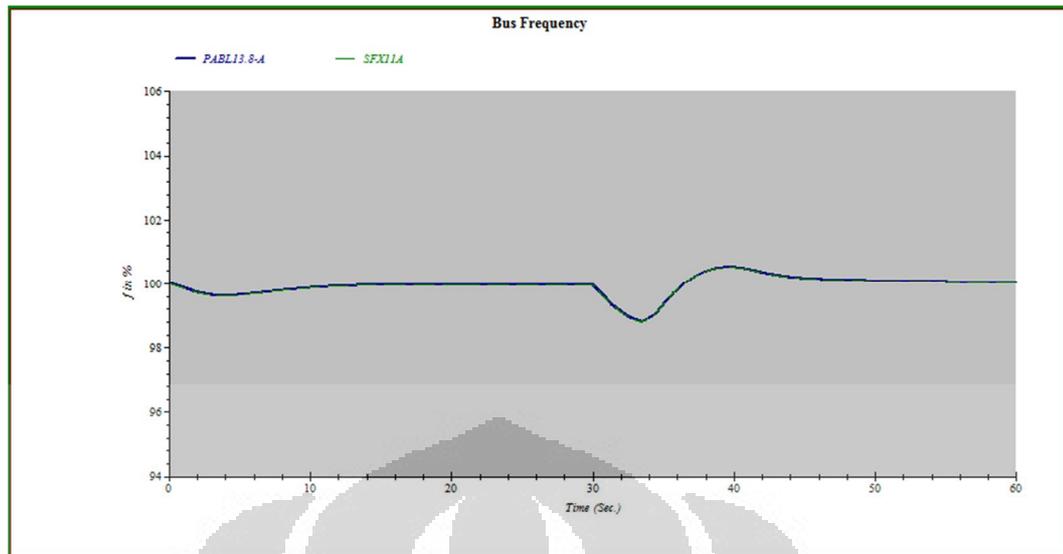
Daya aktif yang dihasilkan oleh G9 sesaat sebelum terjadi gangguan adalah 3,77 MW. Setelah terjadi gangguan dan dilakukan suatu pelepasan beban, daya aktif yang mampu disuplai oleh G9 mencapai 3,77 MW. Sedangkan GEN 21 sesaat sebelum terjadi gangguan mensuplai 3,39 MW dan setelah gangguan dan terjadi pelepasan beban, daya aktif yang mampu disuplai 3,84 MW.

i. G4, G9 dan Gen 14 Lepas

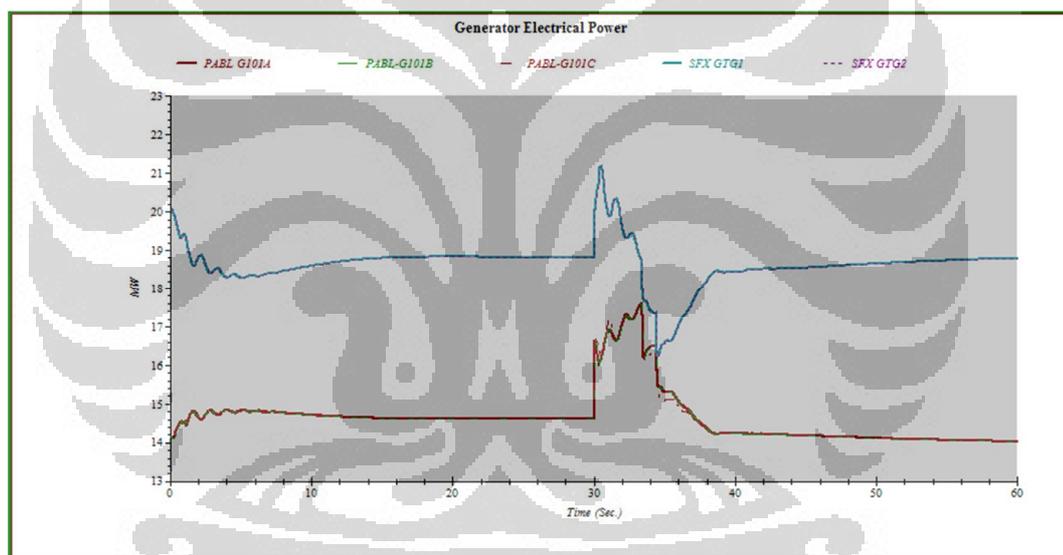
Pada skenario ini terdapat 3 unit generator lepas yaitu G4, G9 dan Gen 14. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.9 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G4, G9 dan Gen 14 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	86,92	75,55	4,664	5,924	OFF	4,65	4,65



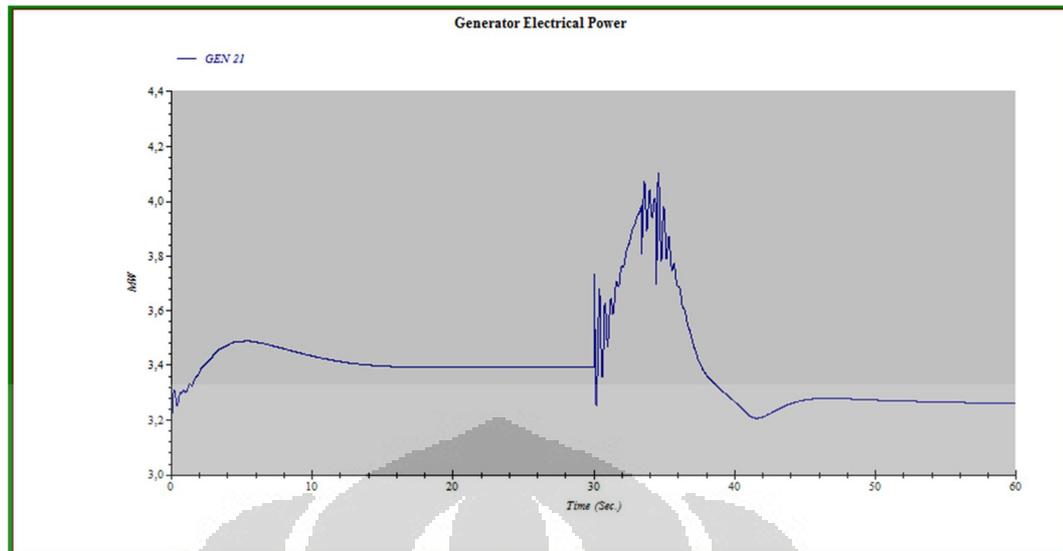
Gambar 5.25 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4, G9 dan Gen 14 Lepas



Gambar 5.26 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4, G9 dan Gen 14 Lepas

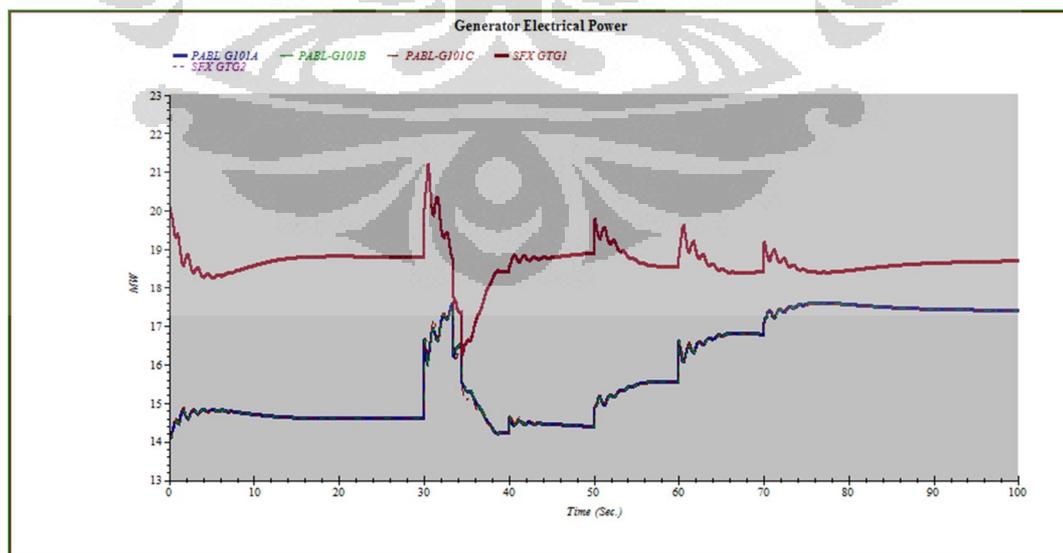
Pada skenario ini terdapat 3 unit generator lepas. Lepasnya ketiga generator tersebut membuat sistem tenaga listrik kehilangan suplai daya aktif sekitar 10 MW dan tidak membuat pemutus tenaga di C-85 bekerja sehingga sistem tenaga listrik setelah gangguan masih menjadi satu kesatuan. Ketika gangguan terjadi, daya aktif yang mampu disuplai oleh G101A, G101B dan G101C meningkat hingga mencapai 18 MW. Begitu juga yang dialami oleh 2 unit generator di Seafox. Ketika gangguan terjadi, suplai daya aktif yang dihasilkan generator

meningkat sesaat karena suplai daya aktif dari pembangkit di area Selatan menuju unit bisnis Utara yang melewati kabel C-85 sempat mengalami penurunan. Sehingga untuk memenuhi kebutuhan beban unit bisnis Utara, pembangkit di Seafox memberikan respon peningkatan suplai daya aktif. Ketika pembangkit di Pabelokan berusaha meningkatkan daya suplai untuk unit bisnis Utara, frekuensi sistem mulai menurun hingga menyentuh nilai 59,25 Hz. Penurunan frekuensi tersebut jika dibiarkan akan pulih dengan sendirinya dan membutuhkan waktu kurang lebih 10 detik. Hal ini terjadi karena peningkatan daya suplai yang dialami oleh 3 unit generator masih sesuai dengan *rating* kerja generator, namun dalam hal ini generator berada pada kondisi marginal (90% beban penuh). Pada perancangan sistem pelepasan beban yang diterapkan di sistem tenaga listrik ini, penurunan frekuensi hingga 59 Hz diijinkan terjadi kurang dari 1 detik. Sesuai dengan standar frekuensi IEEE C37-106 2003, penurunan frekuensi hingga 59,25 Hz selama 10 detik masih diperbolehkan terjadi. Namun, pada sistem pelepasan beban ini tidak menghendaki demikian karena waktu tunda tersebut relatif terlalu lama sehingga dapat mempengaruhi besarnya beban yang dilepaskan pada skenario lainnya dan mencegah terjadinya kerusakan pada generator yang masih aktif. Sehingga dalam kasus ini, untuk memulihkan frekuensi hingga mencapai titik yang diperbolehkan oleh sistem yaitu rentang 59,5 – 60,5 Hz dibutuhkan 2 tahap pelepasan beban. Untuk unit bisnis Selatan Tengah beban yang harus dilepas 4,664 MW dan untuk unit bisnis Utara beban yang harus dilepas 5,924 MW. Pelepasan beban mulai dilakukan pada detik 3 setelah gangguan diberikan. Setelah dilakukan pelepasan beban frekuensi sistem dapat pulih 4,65 setelah gangguan. Untuk mengurangi hilangnya produksi dan meminimalisasi kerugian perusahaan, maka setelah sistem kembali stabil beban yang telah dilepaskan dapat dihubungkan kembali karena 3 unit generator di Pabelokan sebenarnya masih mampu untuk mensuplai kebutuhan daya tersebut.



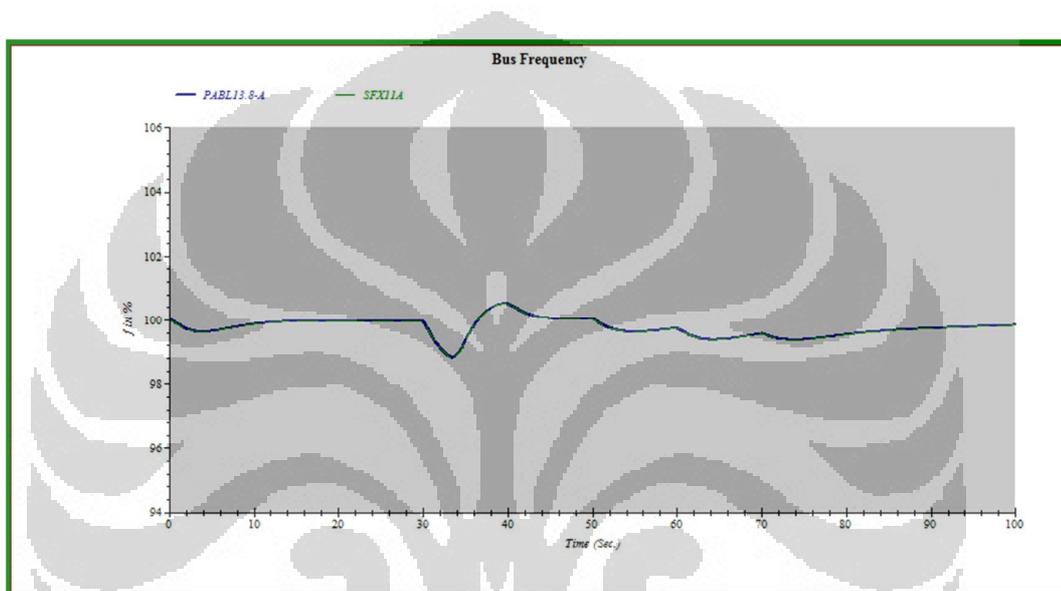
Gambar 5.27 Perubahan Daya Aktif GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G4, G9 dan Gen 14 Lepas

Daya aktif yang dihasilkan oleh GEN 21 sesaat sebelum terjadi gangguan mencapai 3,39 MW. Setelah sistem kembali stabil, GEN 21 mampu mensuplai 3,2 MW. Hal ini tidak sesuai dengan pengaturan yang diberikan kepada generator tersebut yaitu *droop* 3 MW. Kondisi GEN 21 yang memiliki nilai konstanta inersia yang relatif kecil bila dibandingkan dengan generator lain yang masih aktif membuat GEN 21 lebih mudah goyah terhadap gangguan dalam hal ini gangguan beban lebih.



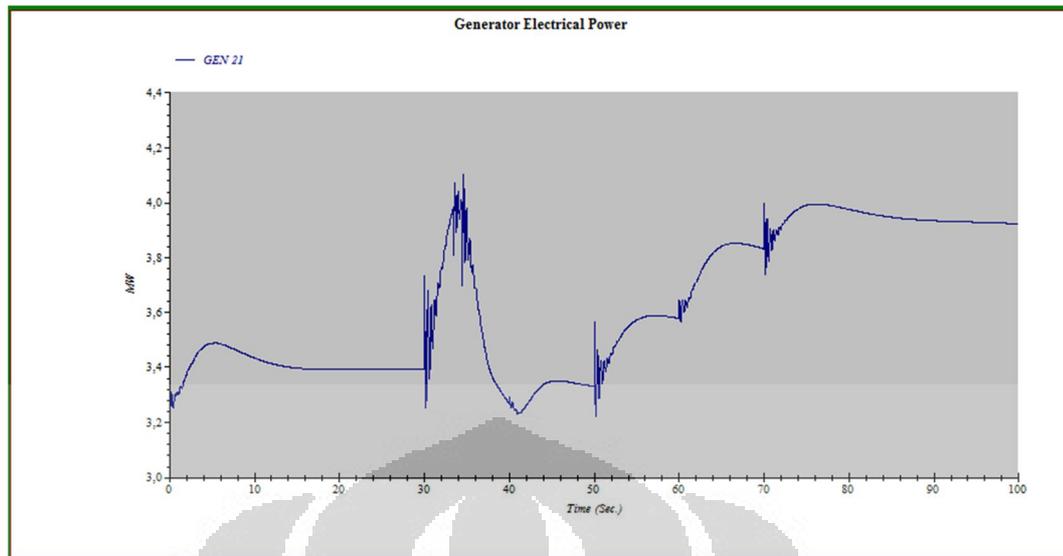
Gambar 5.28 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, G9 dan Gen 14 Lepas

Untuk mengurangi kerugian perusahaan dan dengan melihat cadangan berputar generator yang masih cukup banyak, maka setelah frekuensi sistem kembali stabil beban-beban yang telah lepas dihubungkan kembali ke dalam sistem secara bertahap setiap 10 detik. Hal ini bertujuan untuk menghindari adanya penurunan frekuensi karena penambahan beban yang cukup besar secara tiba-tiba. Terlihat pada gambar 5.28 bahwa G101A, G101B dan G101C mampu meningkatkan suplai daya aktif hingga hampir mencapai 18 MW.



Gambar 5.29 Perubahan Frekuensi Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, G9 dan Gen 14 Lepas

Frekuensi sistem setelah beban yang telah dilepaskan dihubungkan kembali tetap terjaga di atas nilai 59,5 Hz sehingga tidak terjadi pelepasan beban. Hal ini merupakan akibat pemilihan durasi waktu penghubungan kembali beban ke dalam sistem setiap 10 detik. Dalam waktu 10 detik penurunan frekuensi yang dialami setiap tahap penambahan beban telah mengalami pemulihan sehingga frekuensi sistem setelah semua beban dihubungkan kembali relatif stabil.



Gambar 5.30 Perubahan Daya Aktif Gen 21 Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, G9 dan Gen 14 Lepas

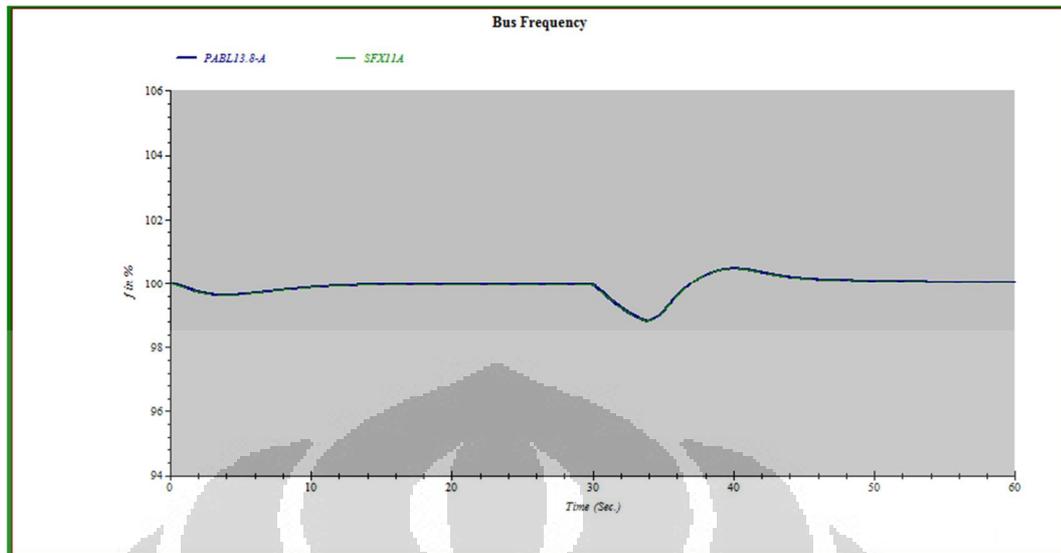
Pada gambar 5.30 terlihat bahwa terjadi peningkatan suplai daya aktif yang cukup signifikan pada Gen 21. Hal ini menunjukkan pengaruh nilai konstanta inersia yang kecil terhadap kestabilan generator. Gen 21 memiliki konstanta inersia jauh lebih kecil daripada 5 unit generator yang masih aktif lainnya sehingga generator tersebut mengalami ketidakstabilan dengan meningkatkan suplai daya aktifnya hingga 4 MW. Sedangkan pada kondisi normal generator tersebut seharusnya menghasilkan daya aktif 3 MW.

j. G4, Gen 14 dan GEN 21 Lepas

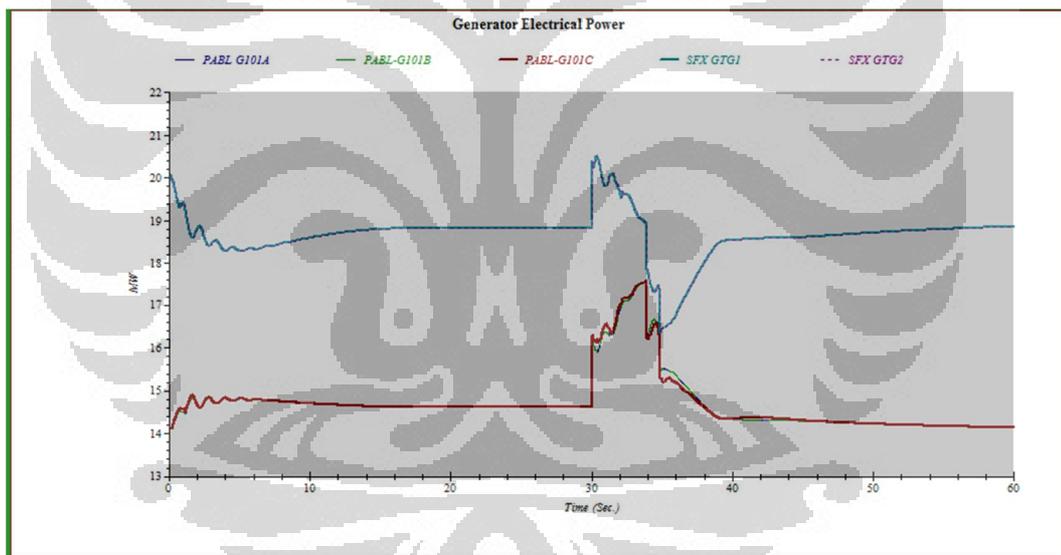
Pada skenario ini terdapat 3 unit generator lepas yaitu G4, Gen 14 dan GEN 21. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.10 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G4, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	83,11	75,75	4,664	5,924	OFF	5,09	5,09



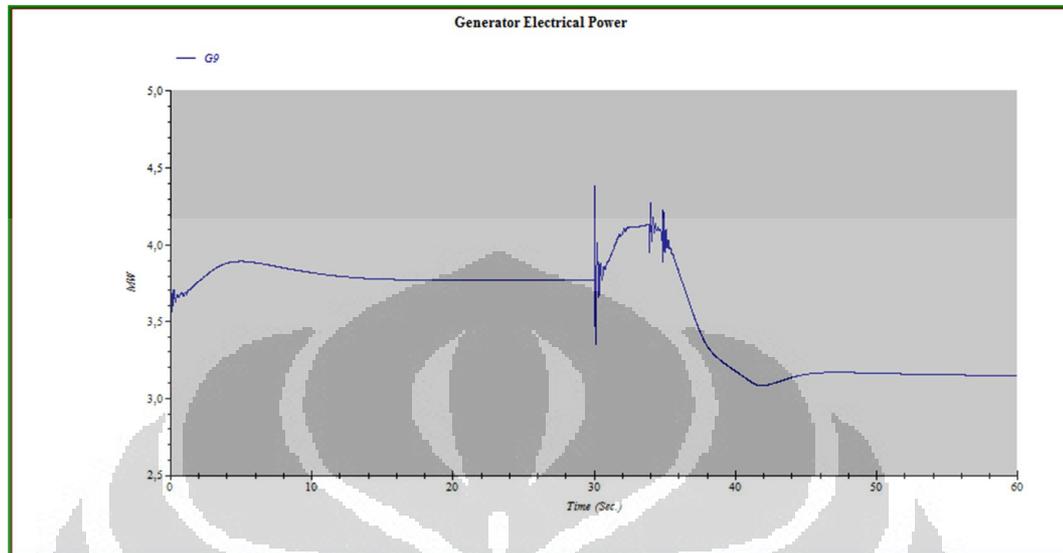
Gambar 5.31 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4, GEN 21 dan Gen 14 Lepas



Gambar 5.28 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

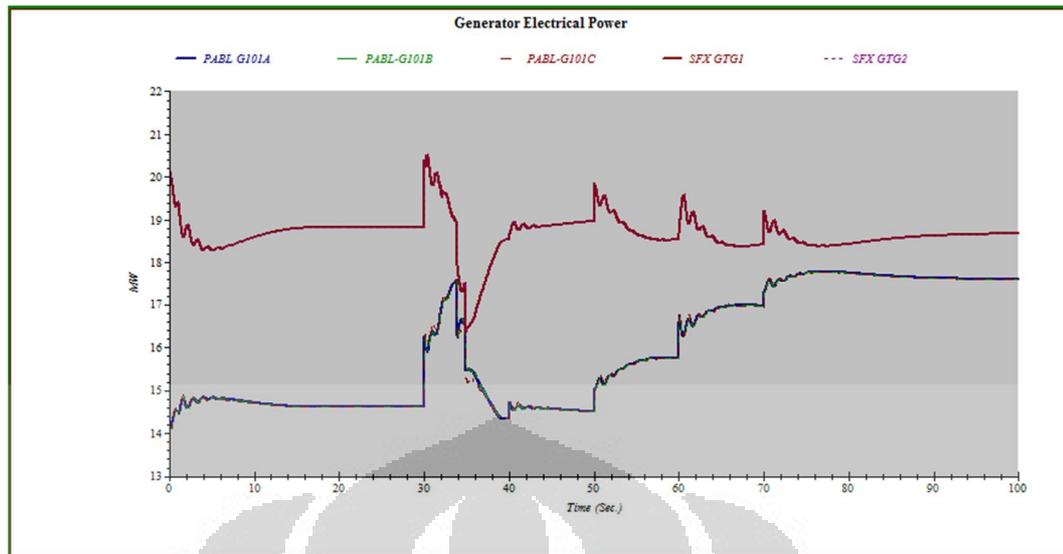
Skenario ini hampir sama dengan skenario sebelumnya yaitu terdapat 3 unit generator lepas dan daya aktif yang hilang akibat gangguan sekitar 9,5 MW. Frekuensi sistem turun hingga mencapai 59,26 Hz sehingga perlu dilakukan 2 tahap pelepasan beban. Untuk unit bisnis Selatan Tengah beban yang dilepaskan sebesar 4,664 MW dan unit bisnis Utara melepas 5,924 MW beban yang dimulai 3,4 detik setelah gangguan. Setelah dilakukan pelepasan beban tersebut frekuensi

generator kembali pulih 5,09 detik setelah gangguan atau 1,5 detik setelah pelepasan beban.



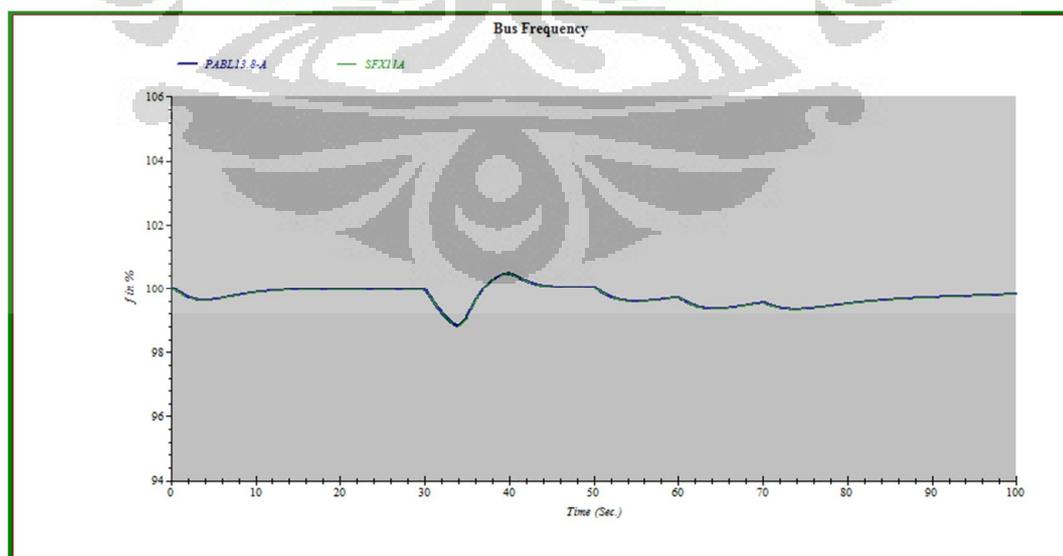
Gambar 5.33 Perubahan Daya Aktif G9 Sebelum dan Setelah Gangguan G4, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

Suplai daya aktif yang dihasilkan oleh G9 sebelum terjadi gangguan mencapai 3,77 MW. Ketika terjadi gangguan sempat terjadi lonjakan suplai daya aktif hingga lebih dari 4,5 MW. Hal ini merupakan respon generator terhadap hilangnya beberapa pembangkit dalam sistem. Setelah kondisi sistem mulai stabil, suplai daya aktif G9 hanya 3 MW. Jumlah suplai tersebut lebih kecil bila dibandingkan dengan pengaturan yang diberikan terhadap G9 yaitu *droop* 3,5 MW. Penyimpangan tersebut masih berada dalam toleransi pengaturan yang diberikan terhadap G9.

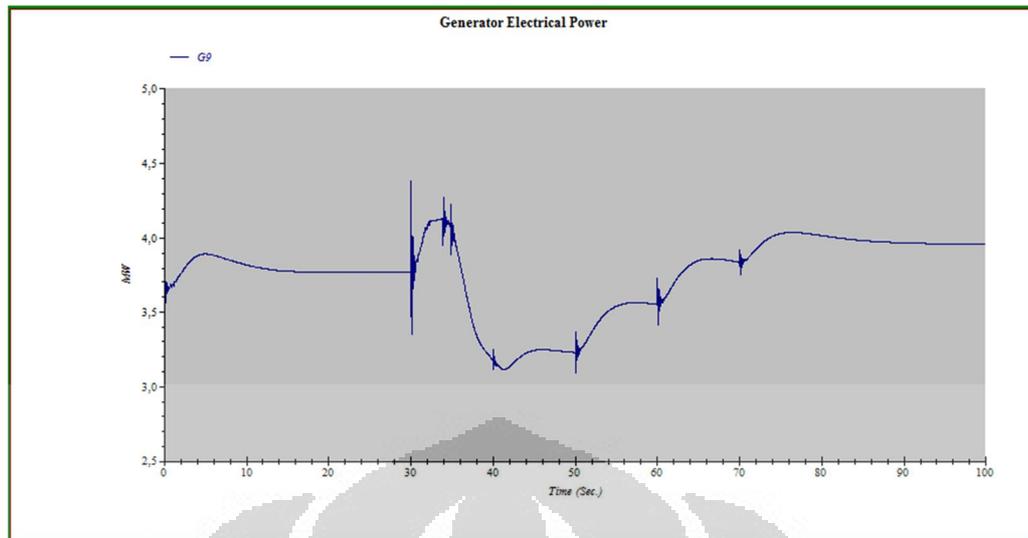


Gambar 5.34 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, Gen14 dan GEN 21 Lepas

Seperti skenario sebelumnya, pada skenario ini seharusnya tidak terjadi pelepasan beban. Namun, karena waktu tunda rele lebih cepat daripada pemulihan frekuensi tanpa pelepasan beban maka pelepasan beban terjadi hingga 2 tahap. Untuk mengurangi kerugian perusahaan, setelah frekuensi kembali stabil beban yang dilepaskan dihubungkan kembali ke sistem. Hal ini tidak mengganggu frekuensi sistem karena beban dihubungkan secara bertahap setiap 10 menit.



Gambar 5.35 Perubahan Frekuensi Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, Gen14 dan Gen 21 Lepas



Gambar 5.36 Perubahan Daya Aktif Gen 21 Setelah Menghubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, Gen 14 dan Gen 21 Lepas

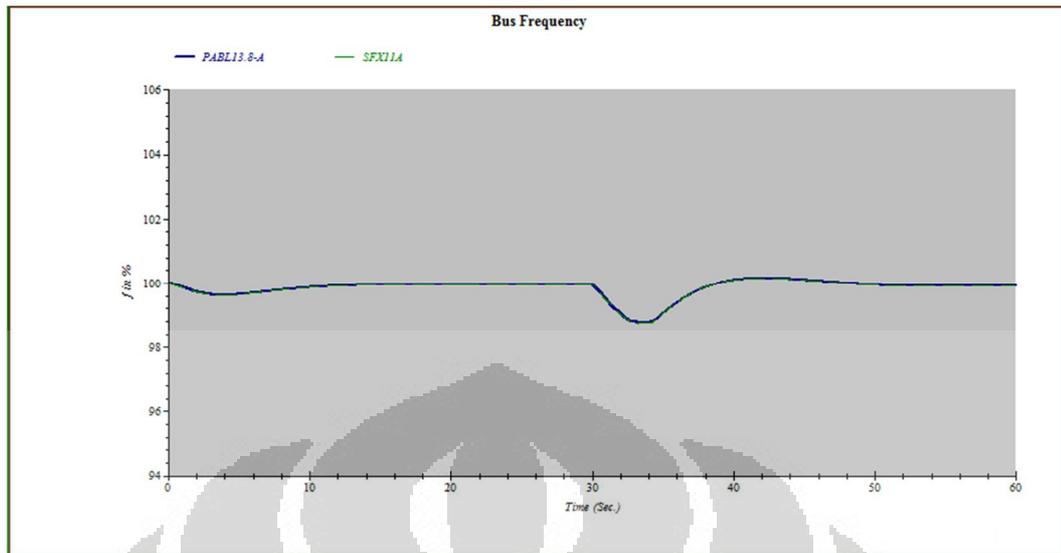
Pengembalian beban yang dilepas ke sistem mengakibatkan terjadinya peningkatan suplai daya aktif G9 hingga 4 MW. Hal ini tidak sesuai dengan pengaturan yang diberikan kepada generator karena seharusnya G9 hanya dapat mensuplai 3,5 MW. Peningkatan ini merupakan akibat dari kecilnya nilai konstanta inersia generator jika dibandingkan dengan 5 unit generator lain yang masih aktif. Semakin kecil konstanta inersia maka generator tersebut semakin mudah mengalami ketidakstabilan.

k. G4, G9, Gen 14 dan GEN 21

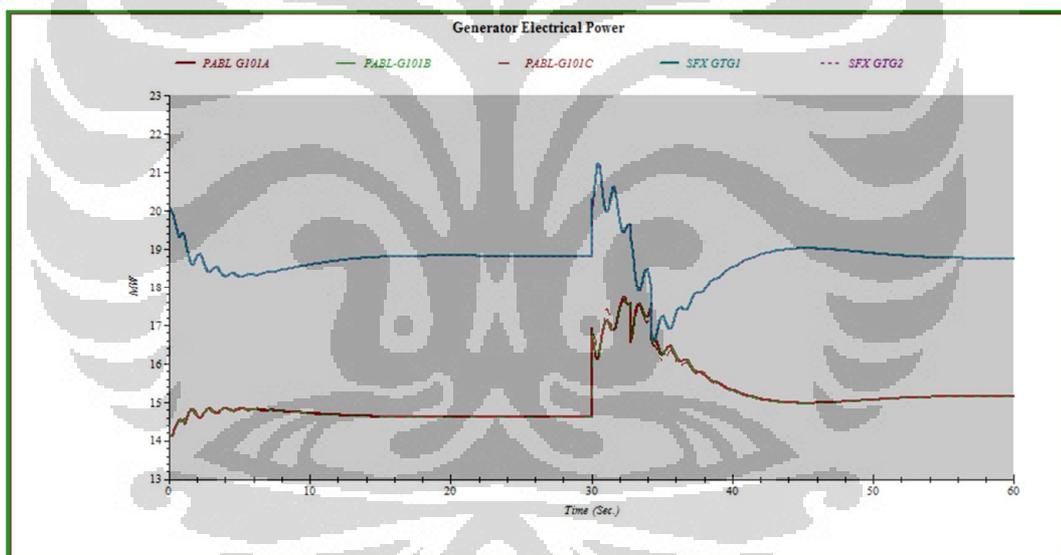
Pada skenario ini terdapat 4 unit generator lepas yaitu G4 dan G9, 2 unit generator yang terletak di unit bisnis Tengah serta Gen 14 dan GEN 21, generator di unit bisnis Utara (Widuri-P). Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.11 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G4, G9, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	82,98	75,75	4,664	5,924	OFF	5,28	5,28



Gambar 5.37 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G4, G9, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

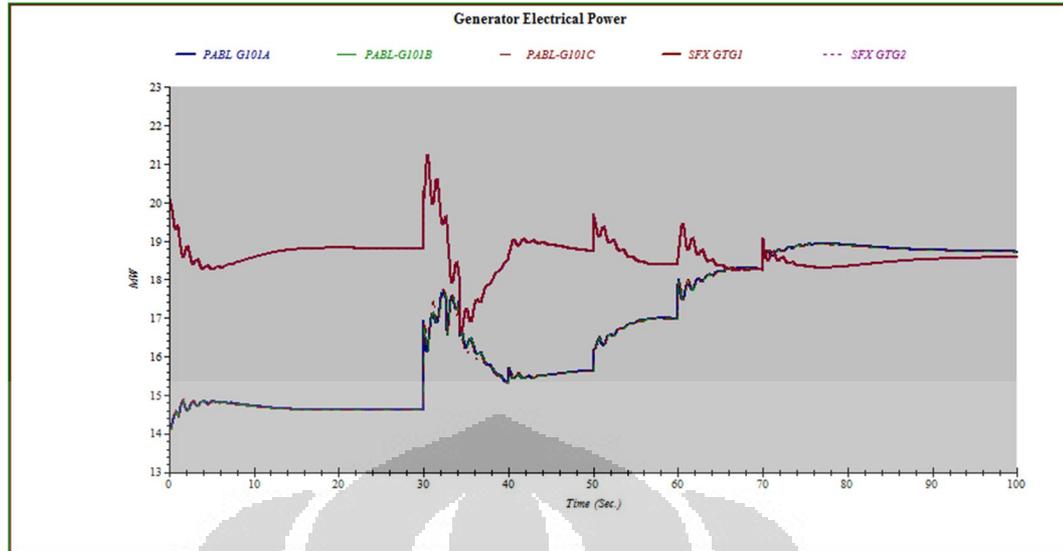


Gambar 5.38 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G4, G9, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

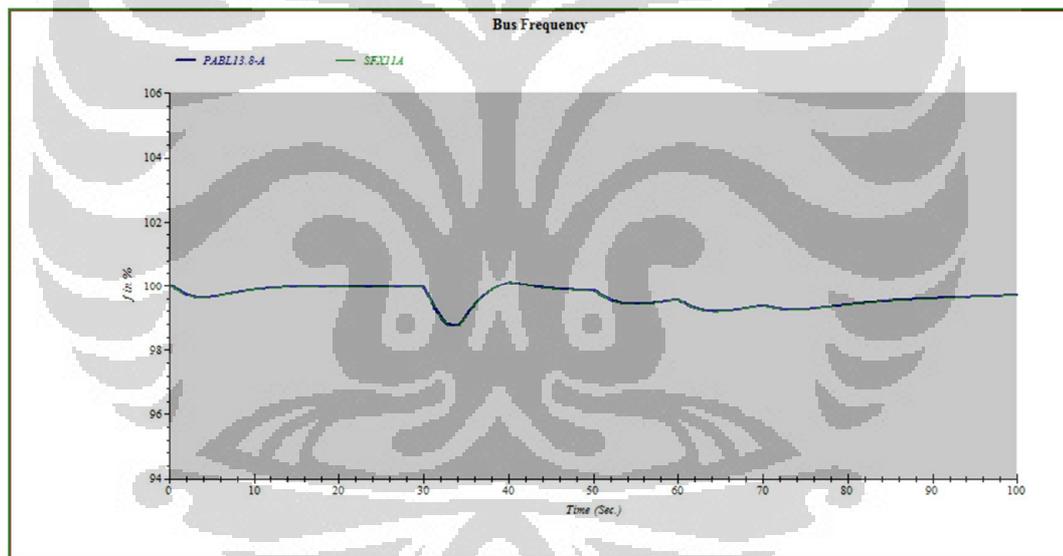
Lepasnya 4 generator tersebut membuat sistem kehilangan suplai daya aktif sekitar 13 MW. Ketika gangguan tersebut diberikan pemutus tenaga pada C-85 tidak bekerja sehingga sistem tenaga listrik masih dalam satu kesatuan. Suplai daya aktif yang dihasilkan oleh 5 generator lain yang masih bekerja meningkat saat terjadi gangguan. Peningkatan daya aktif yang disuplai oleh generator di Seafox terjadi karena suplai daya yang melewati C-85 mulai menurun karena adanya 2 unit generator di unit bisnis Tengah yang lepas. Sehingga untuk

memenuhi kebutuhan unit bisnis Utara generator di Seafox memberikan respon peningkatan daya aktif sesaat. Hal ini berlangsung sesaat karena generator di Pabelokan yang bekerja pada mode *isochronous* meningkatkan suplainya hingga lebih dari 17 MW untuk mengatasi kekurangan suplai daya pada unit bisnis Selatan, Tengah maupun Utara. Meskipun daya aktif yang dihasilkan oleh generator di Pabelokan ini masih dalam rentang *rating* kerja generator, frekuensi sistem semakin lama semakin menurun hingga 59,24 Hz. Penurunan tersebut menyebabkan terjadinya pelepasan beban sebanyak 2 tahap agar dapat mengembalikan frekuensi pada nilai yang diijinkan oleh sistem. Besar beban yang dilepaskan 4,664 MW untuk unit bisnis Selatan Tengah dan 5,924 MW untuk unit bisnis Utara. Setelah dilakukan pelepasan beban, frekuensi kembali pulih 5,28 detik setelah gangguan. Jika dibandingkan dengan skenario sebelumnya, daya yang hilang akibat generator lepas lebih besar yaitu 13 MW. Namun, jumlah beban yang dilepaskan untuk meningkatkan frekuensi agar kembali normal sama. Hal ini berakibat pada waktu pemulihan yang terjadi lebih lama bila dibandingkan dengan skenario sebelumnya.

Pada skenario ini terlihat bahwa G101A, G101B dan G101C setelah gangguan dan pelepasan beban menghasilkan daya aktif sekitar 15 MW. Jika beban yang telah dilepaskan tersebut dihubungkan kembali, cadangan berputar yang dimiliki ketiga generator tersebut mencukupi kebutuhan konsumsi beban. Untuk mendapatkan frekuensi sistem yang relatif stabil, pengembalian beban kembali ke sistem dilakukan bertahap setiap 10 detik sebanyak 4 tahap. Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan kondisi daya aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 setelah beban dihubungkan kembali serta perubahan frekuensi sistem yang terjadi karena hal tersebut.



Gambar 5.39 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Setelah Menhubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, G9, Gen14 dan GEN 21 Lepas



Gambar 5.40 Perubahan Frekuensi Setelah Menhubungkan Kembali Beban yang Telah Dilepaskan Saat G4, Gen14 dan Gen 21 Lepas

1. Gen 14 Lepas

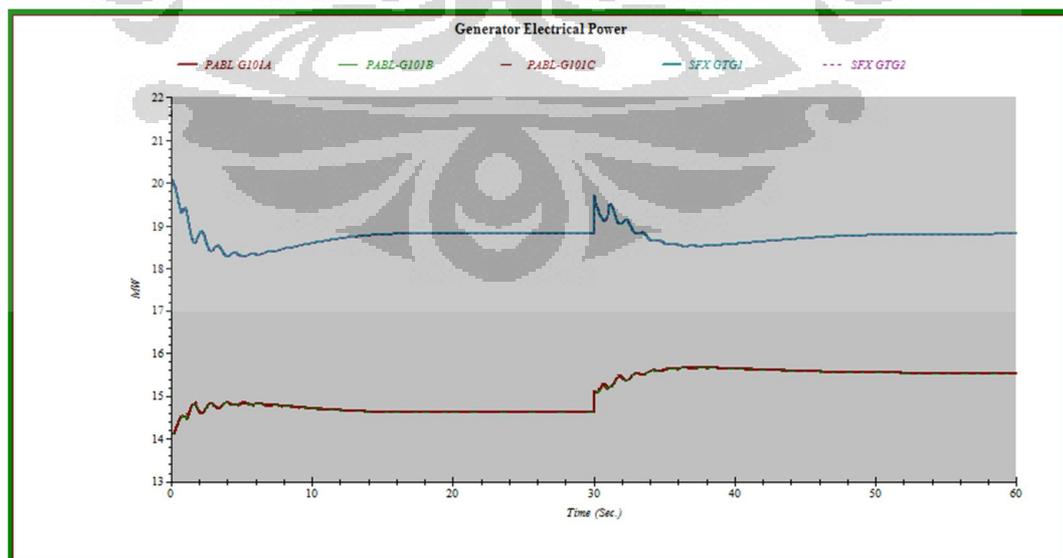
Pada skenario ini terdapat 1 unit generator lepas yaitu Gen 14 (3 MW). Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.12 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika Gen 14 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	95,73	86,34	0	0	OFF	-	-

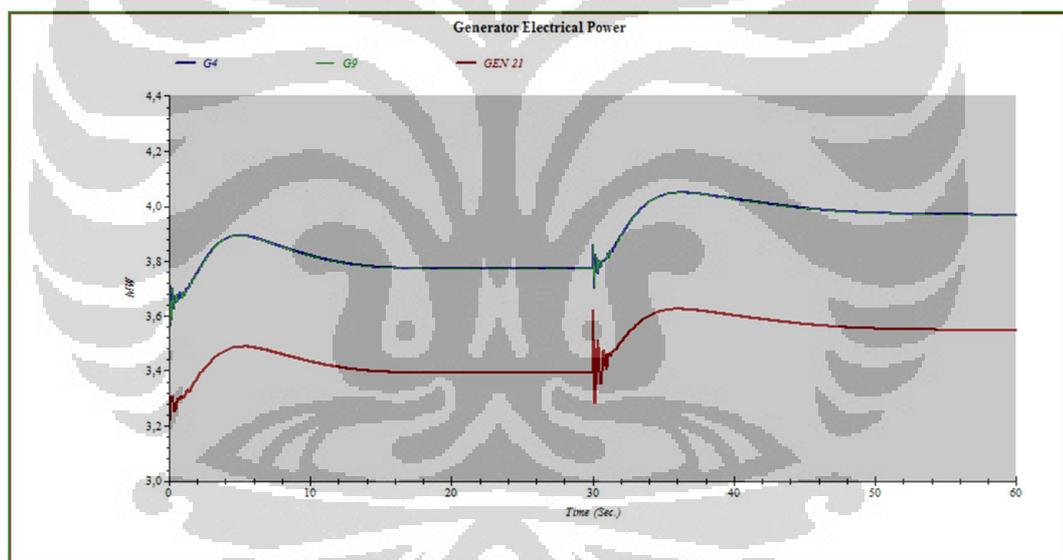


Gambar 5.41 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan Gen 14 Lepas



Gambar 5.42 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan Gen 14 Lepas

Cadangan berputar yang dimiliki oleh 3 unit generator di Pabelokan masih bisa memenuhi kehilangan daya tersebut maka tidak terjadi penurunan frekuensi yang signifikan pada skenario ini. Pada saat terjadi gangguan terdapat lonjakan suplai daya aktif sesaat pada SFX GTG1 dan SFX GTG2. Hal ini menunjukkan adanya kondisi kekurangan daya aktif pada unit bisnis Utara akibat Gen 14 lepas dari sistem. Namun, hal ini hanya berlangsung sesaat karena generator di Pabelokan dapat meningkatkan produksi daya aktif untuk menutupi kekurangan tersebut. Lepasnya Gen 14 membuat sistem kehilangan daya aktif sekitar 3 MW. Sebagai respon dari hilangnya daya aktif tersebut masing-masing generator di Pabelokan yaitu G101A, G101B dan G101C meningkatkan suplainya sekitar 1 MW menjadi 15,5 MW.



Gambar 5.43 Perubahan Daya Aktif G4, G9 dan GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan Gen 14 Lepas

Suplai daya aktif dari G4 dan G9 sebelum terjadi gangguan mencapai 3,77 MW. Setelah terjadi gangguan kedua generator tersebut mampu mensuplai daya aktif sebanyak 3,9 MW. Hal ini kurang sesuai dengan pengaturan yang diberikan kepada kedua generator tersebut yaitu *droop* 3,5 MW. Penyimpangan ini disebabkan oleh konstanta inersia dari generator yang cukup kecil sehingga ketika terjadi gangguan pada sistem maka generator tersebut lebih mudah goyah dibandingkan dengan generator lain yang memiliki nilai konstanta inersia lebih

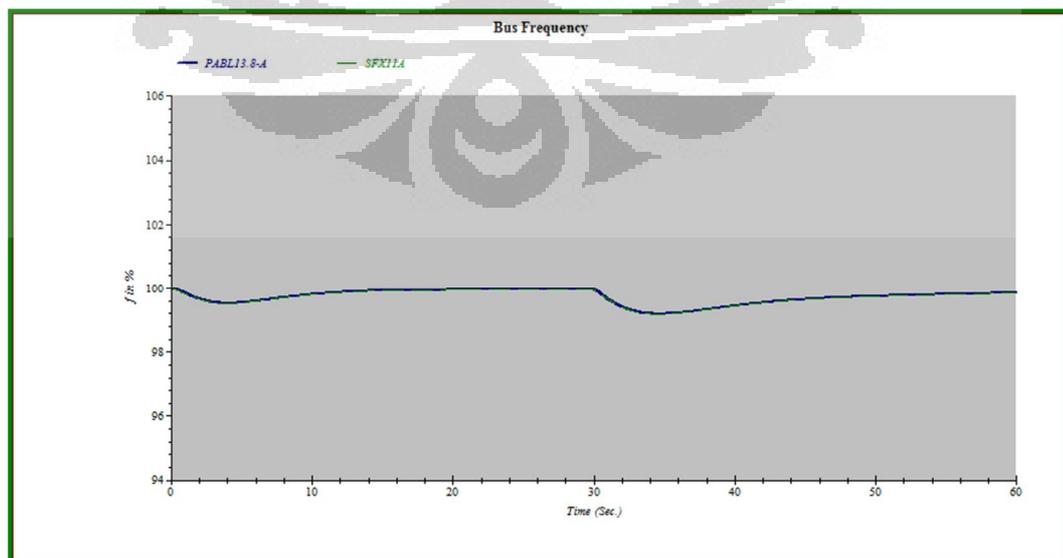
besar sehingga mampu menghasilkan daya aktif yang lebih besar dari yang seharusnya dihasilkan. Begitu juga dengan GEN 21, daya aktif yang dihasilkan sebelum gangguan mencapai 3,39 MW dan setelah gangguan, daya aktif yang mampu dihasilkan adalah 3,55 MW. Nilai konstanta inersia dari GEN 21 lebih besar bila dibandingkan dengan G4 dan G9 namun masih jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan 5 generator yang lain. Sehingga jika terjadi gangguan, GEN 21 relatif masih mudah goyah dan tidak dapat mempertahankan pengaturan yang diterapkan kepadanya.

m. Gen 14 dan GEN 21 Lepas

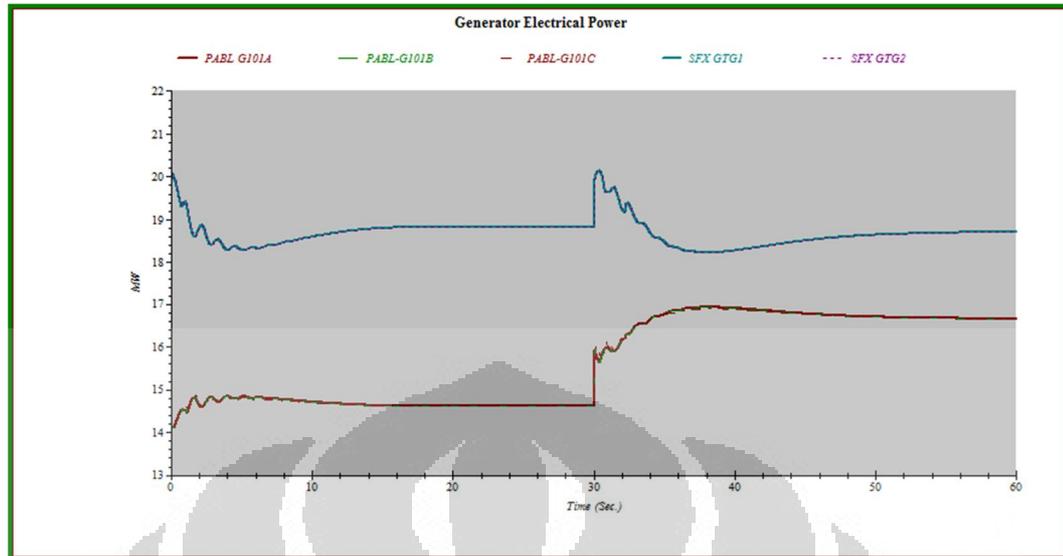
Pada skenario ini terdapat 2 unit generator lepas yaitu Gen 14 dan GEN 21. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.13 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika Gen 14 dan GEN 21 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	95,29	86,34	-	-	OFF	-	-

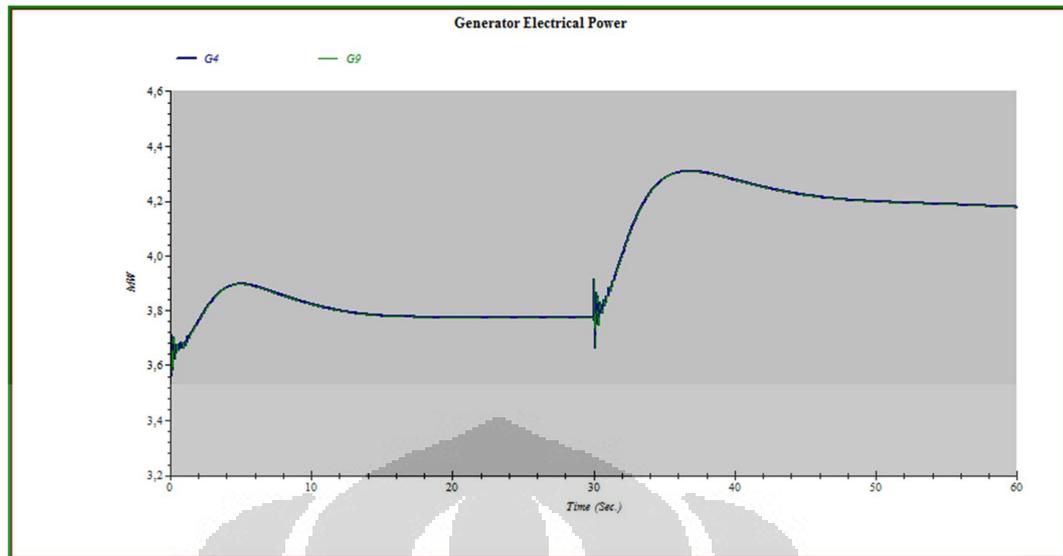


Gambar 5.44 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan Gen 14 dan GEN 21 Lepas



Gambar 5.45 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan Gen 14 dan GEN 21 Lepas

Ketika gangguan terjadi, daya aktif yang hilang akibat generator lepas dapat digantikan oleh suplai daya aktif dari 3 unit generator di Pabelokan. Cadangan berputar yang dimiliki oleh 3 unit generator di Pabelokan masih bisa memenuhi kehilangan daya aktif tersebut sehingga tidak terjadi penurunan frekuensi yang signifikan pada skenario ini. Lonjakan daya aktif pada 2 unit generator di Seafox yang ditunjukkan gambar 5.37 merupakan respon terhadap gangguan. Ketika Gen 14 dan GEN 21 lepas, unit bisnis Utara tentu kehilangan daya aktif sekitar 6 MW. Oleh sebab itu 2 unit generator di Seafox memberikan respon peningkatan suplai daya aktif untuk memenuhi kebutuhan daya yang hilang tersebut. Namun, hal ini hanya berlangsung sesaat karena generator di Pabelokan dapat meningkatkan suplai daya aktifnya 2 MW dari kondisi awal 14,82 MW, untuk menutupi kekurangan tersebut suplai daya aktif masing-masing generator menjadi 16,66 MW.



Gambar 5.46 Perubahan Daya Aktif G4 dan G9 Sebelum dan Setelah Gangguan Gen 14 dan GEN 21 Lepas

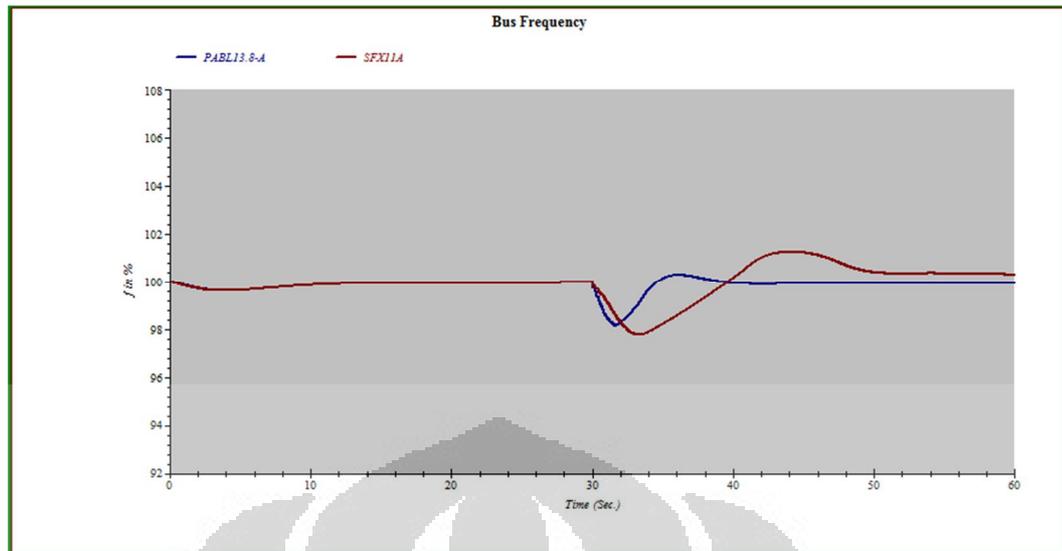
Daya aktif yang dihasilkan G4 dan G9 tersebut meningkat hingga 4,18 MW setelah gangguan, seharusnya kedua generator tersebut menghasilkan daya aktif *droop* 3,5 MW. Penyimpangan ini terjadi karena konstanta inersia (H) yang dimiliki oleh G4 dan G9 (0,584 MJ/MVA) jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan konstanta inersia yang dimiliki generator G101A, G101B dan G101C (7,39 MJ/MVA). Sehingga G4 dan G9 mudah mengalami ketidakstabilan jika terjadi gangguan.

n. G101A, G4 dan Gen 14 Lepas

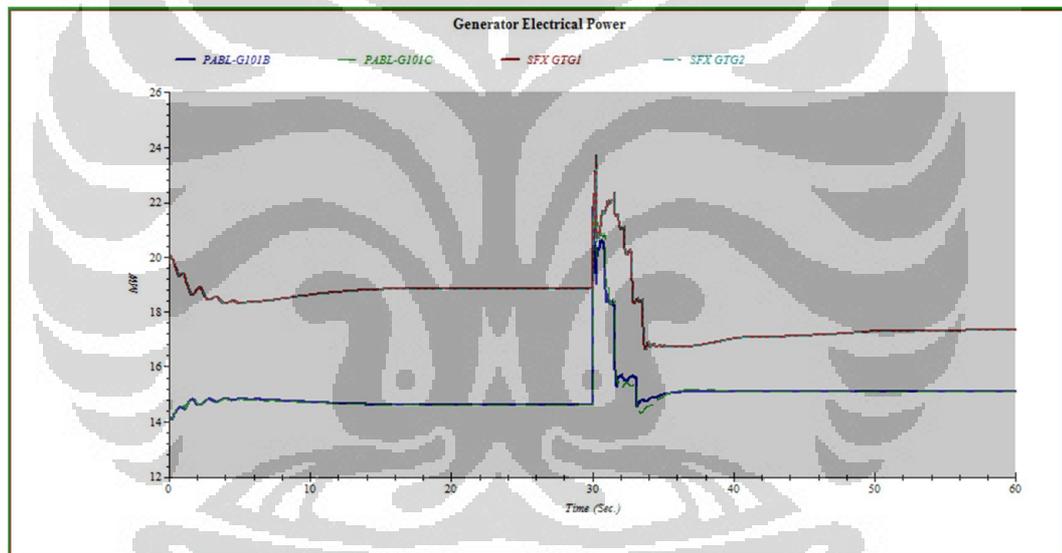
Pada skenario ini terdapat 3 unit generator lepas G101A, G4 dan Gen 14. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.14 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G101A, G4 dan Gen 14 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	71,26	65,95	7,726	12,661	ON	3,34	7,52



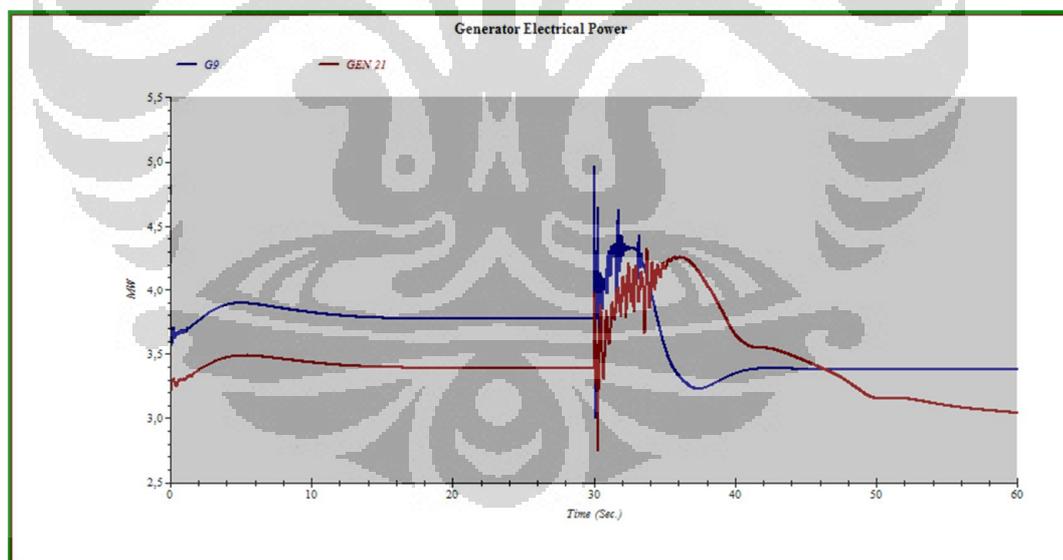
Gambar 5.47 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan Gen 14 dan Lepas



Gambar 5.48 Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan Gen 14 Lepas

Lepasnya ketiga generator tersebut menyebabkan bekerjanya pemutus tenaga di C-85 karena *under power*. Daya aktif yang hilang akibat gangguan ini kurang lebih 21,5 MW. Ketika gangguan diberikan, suplai daya aktif yang dihasilkan oleh G101B dan G101C meningkat hingga lebih dari 20 MW. Hal ini sesuai dengan fungsi dari ketiga generator tersebut yaitu dimana kekurangan daya aktif yang dialami oleh sistem kemudian akan ditanggung oleh ketiga generator dan besarnya daya aktif yang ditanggung oleh masing-masing generator adalah sama besar

(*isochronous load sharing*). Peningkatan suplai daya aktif yang dialami oleh G101B dan G101C melebihi *rating* kerja dari kedua generator tersebut sehingga menyebabkan terjadinya penurunan frekuensi. Penurunan frekuensi yang terjadi di unit bisnis Selatan Tengah hingga 58,89 Hz. Sehingga untuk dapat memulihkan frekuensi sistem dibutuhkan suatu pelepasan beban hingga 4 tahap yaitu melepas 7,726 MW. Kehilangan suplai daya aktif yang dialami oleh unit bisnis Utara adalah 5,38 MW dari lepasnya C-85 dan lepasnya generator Gen 14 sebesar 3,39 MW. Sehingga total kehilangan daya aktif yang dialami sekitar 8,7 MW. Pelepasan beban yang dialami oleh unit bisnis Utara hingga 5 tahap karena penurunan frekuensi yang terjadi hingga 58,66 Hz. Setelah dilakukan pelepasan beban, daya aktif yang disuplai oleh 2 unit SFX GTG turun hingga 17 MW. Hal ini disebabkan oleh jumlah daya yang dilepas di unit bisnis Utara mencapai 12,661 MW, dimana jumlah tersebut hampir sepertiga dari jumlah beban total di unit bisnis Utara. Setelah melakukan pelepasan beban frekuensi sistem pulih dalam 3,34 detik di unit bisnis Selatan Tengah dan 7,52 detik di unit bisnis Utara.



Gambar 5.29 Perubahan Daya Aktif GEN 21 dan G9 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4 dan Gen 14 Lepas

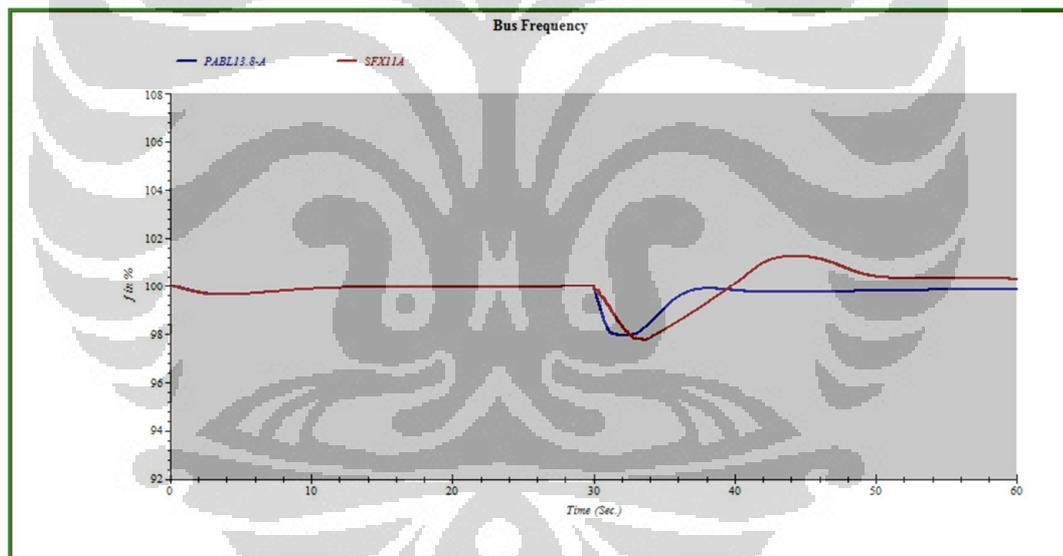
Baik G9 maupun GEN 21 pada skenario ini keduanya bekerja sesuai dengan pengaturan yang diberikan. Setelah gangguan dan pelepasan beban G9 mensuplai daya aktif 3,5 MW dan GEN 21 mensuplai 3 MW.

o. G101A, G4, G9 dan Gen 14 Lepas

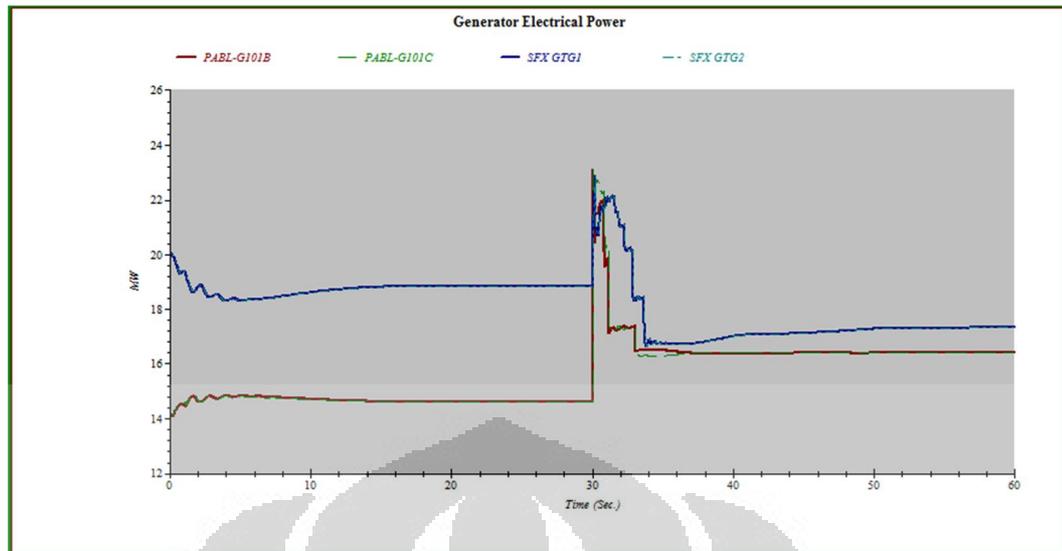
Pada skenario ini terdapat 4 unit generator lepas G101A, G4, G9 dan Gen 14. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.15 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G101A, G4, G9 dan Gen 14 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	70,48	65,95	7,726	12,661	ON	5,16	7,66



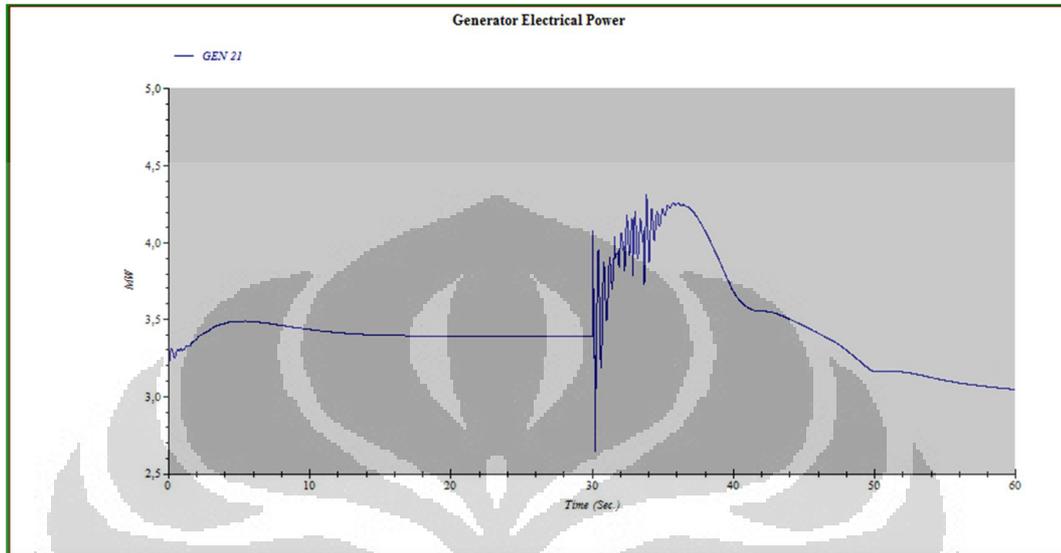
Gambar 5.50 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, G9 dan Gen 14 dan Lepas



Gambar 5.51 Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, G9 dan Gen 14 Lepas

Ketika 4 unit generator tersebut lepas, pemutus tenaga di C-85 bekerja karena *under power* sehingga membuat sistem tenaga listrik terbagi menjadi 2 area yaitu area Selatan Tengah dan area Utara. Ketika kabel C-85 putus, maka pembangkit yang terletak di unit bisnis Selatan yang masih aktif mengalami penurunan beban sebanyak 5,38 MW dan unit bisnis Utara mengalami kekurangan daya suplai 5,38 MW. Akibatnya, sesaat setelah gangguan generator di Pabelokan mengalami peningkatan daya suplai hingga lebih dari 20 MW karena bekerja dengan mode *isochronous load sharing* dan generator di Seafox mengalami lonjakan suplai daya sesaat setelah gangguan hingga 23 MW karena hilangnya suplai daya sekitar 9 MW. Peningkatan daya suplai ini menyebabkan terjadinya penurunan frekuensi pada masing-masing unit bisnis. Unit bisnis Selatan Tengah mengalami penurunan frekuensi hingga 58,77 Hz, sehingga untuk dapat memulihkan frekuensi hingga kondisi normal dibutuhkan 4 tahap pelepasan beban yaitu 7,726 MW dan pulih dalam waktu 5,16 detik. Sedangkan unit bisnis Utara mengalami penurunan frekuensi hingga 58,66 Hz dan dibutuhkan 5 tahap pelepasan beban untuk dapat mengembalikan frekuensi ke kondisi normalnya. Beban yang dilepaskan untuk unit bisnis Utara adalah sebesar 12,661 MW dan pulih 7,66 detik setelah gangguan. Setelah dilakukan pelepasan beban, suplai daya generator di Pabelokan mencapai 16,4 MW dan suplai generator di Seafox mencapai 17 MW.

Generator hanya mensuplai 17 MW karena daya yang dibutuhkan beban lebih sedikit karena beban yang dilepaskan untuk memulihkan frekuensi cukup besar. Jika generator bekerja tetap pada *droop* 19 MW, dikhawatirkan akan terjadi frekuensi lebih (*over frequency*).



Gambar 5.52 Perubahan Daya Aktif GEN 21 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, G9 dan Gen 14 Lepas

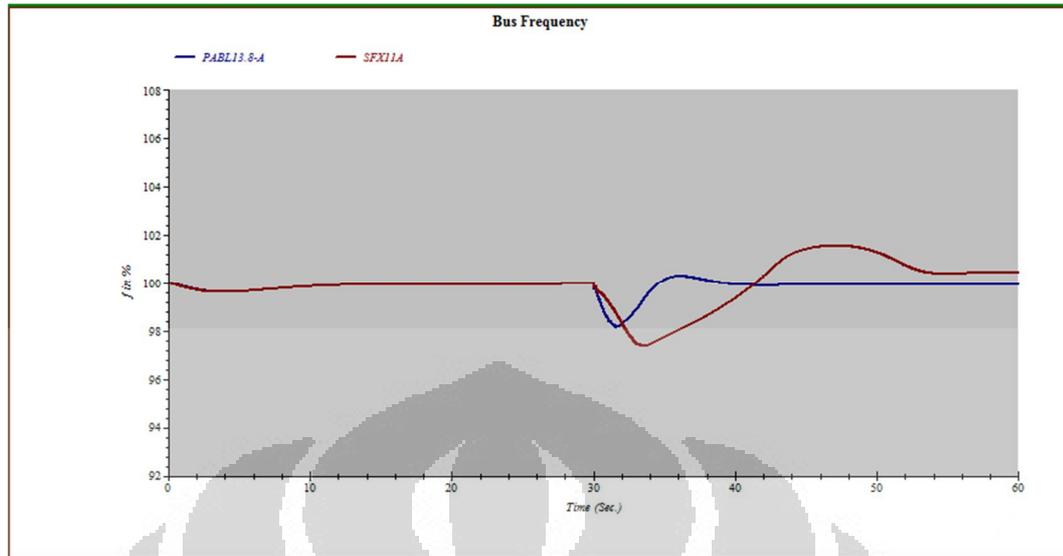
Suplai daya aktif GEN 21 sebelum gangguan sama seperti skenario sebelumnya yaitu 3,39 MW. Hal ini sesuai dengan pengaturan yang diterapkan setelah gangguan generator tersebut bekerja *droop* 3 MW.

p. G101A, G4, Gen14, GEN 21 Lepas

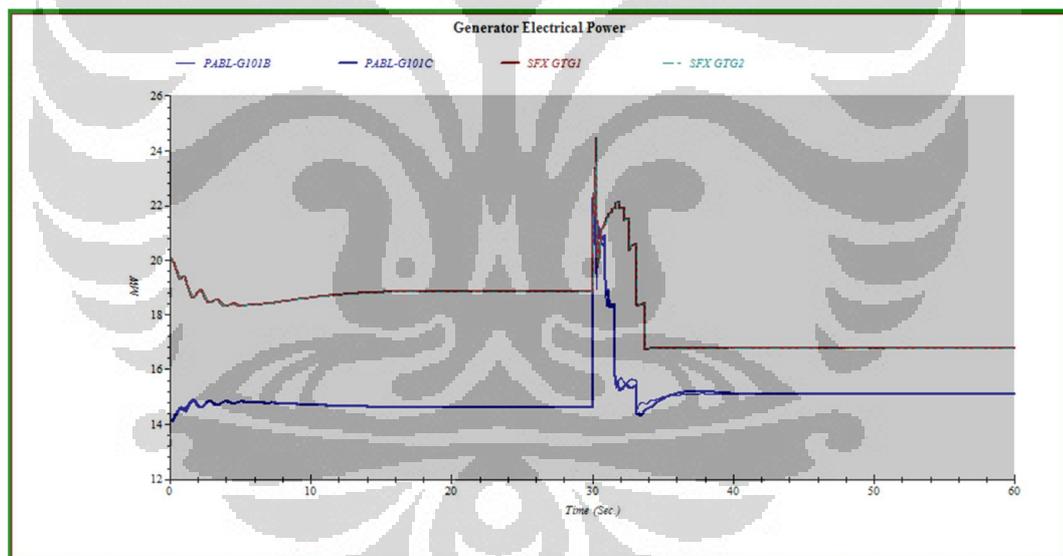
Pada skenario ini terdapat 4 unit generator G101A, G4, Gen14 dan GEN 21. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.16 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G101A, G4, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	67,1	60,82	7,726	17,796	ON	3,33	9,43



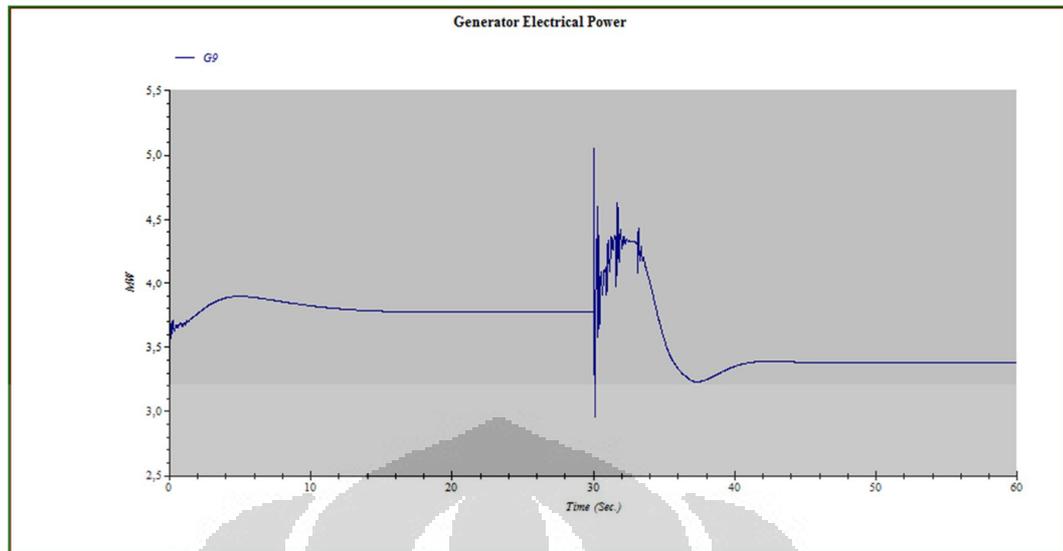
Gambar 5.53 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, GEN 21 dan Gen 14 dan Lepas



Gambar 5.54 Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

Skenario ini sama dengan skenario sebelumnya yaitu terdapat 4 unit generator lepas. Jumlah daya aktif yang hilang akibat generator lepas tersebut mencapai 23,5 MW. Ketika terjadi gangguan, pemutus tenaga di C-85 bekerja karena *under power* sehingga sistem tenaga listrik terbagi menjadi 2 area yaitu area Selatan Tengah dan area Utara. Bekerjanya pemutus tenaga di C-85 membuat pembangkit

di unit bisnis Selatan mengalami penurunan beban yang harus disuplai sebesar 5,38 MW sehingga kekurangan daya aktif pada unit bisnis Selatan Tengah akibat lepasnya G101A dan G4 menjadi sekitar 18 MW. Sedangkan bagi unit bisnis Utara, putusnya kabel C-85 pada skenario ini membuat unit bisnis Utara kehilangan suplai daya sebanyak 5,38 MW. Sehingga kekurangan daya aktif total yang dialami oleh unit bisnis Utara sekitar 12 MW. Akibatnya, G101B dan G101C menghasilkan daya suplai hingga lebih dari 20 MW dan SFX GTG1 dan SFX GTG2 mengalami peningkatan daya suplai yang dihasilkan sesaat menjadi lebih dari 24 MW. Peningkatan ini membuat kedua area tersebut mengalami penurunan frekuensi karena suplai daya aktif yang dihasilkan oleh 4 unit generator besar yang masih aktif melebihi *rating* kerjanya. Penurunan frekuensi yang dialami oleh unit bisnis Selatan mencapai 58,87 Hz, sehingga untuk mengembalikan frekuensi ke keadaan normal dibutuhkan 4 tahap pelepasan beban yaitu 7,726 MW dan frekuensi pulih dalam waktu 3,33 detik. Sedangkan penurunan frekuensi yang dialami oleh unit bisnis Utara mencapai 58,44 Hz dan untuk mengembalikan frekuensi kembali ke keadaan normal dibutuhkan 6 tahap pelepasan beban yaitu 17,796 MW dan pulih dalam waktu 9,43 detik. Setelah dilakukan pelepasan beban suplai daya aktif yang dihasilkan oleh generator di Pabelokan dan Seafox mencapai 17 MW. Penurunan suplai daya aktif yang dihasilkan SFX GTG1 dan SFX GTG 2 diakibatkan oleh jumlah beban yang dilepaskan sangat besar sehingga kebutuhan daya unit bisnis Utara juga menurun.



Gambar 5.55 Perubahan Daya Aktif G9 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

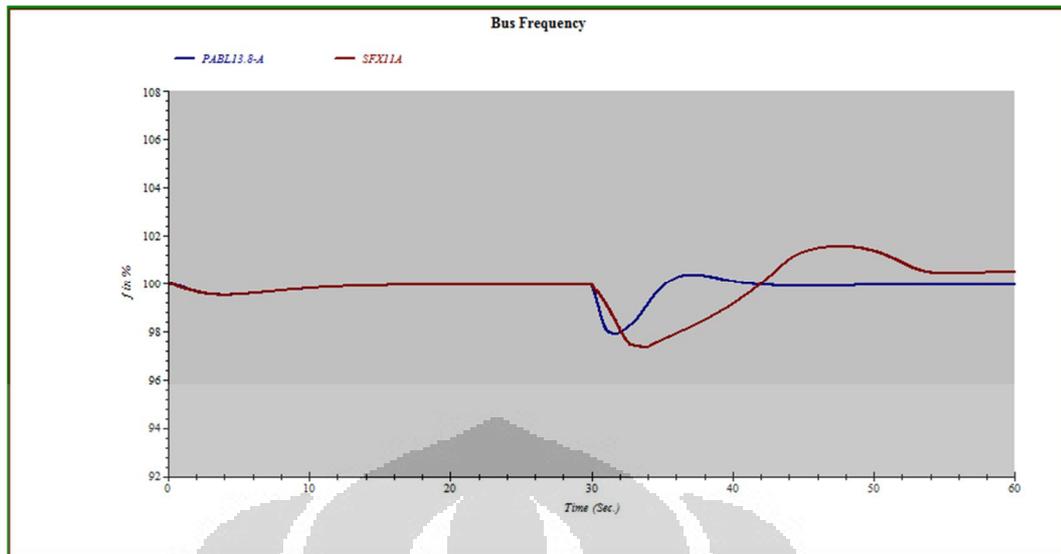
Besar daya aktif yang disuplai G9 setelah gangguan dan pelepasan beban sesuai dengan pengaturan yang diberikan kepada G9 yaitu *droop* 3,5 MW.

q. G101A,G4,G9,Gen 14 dan GEN 21 Lepas

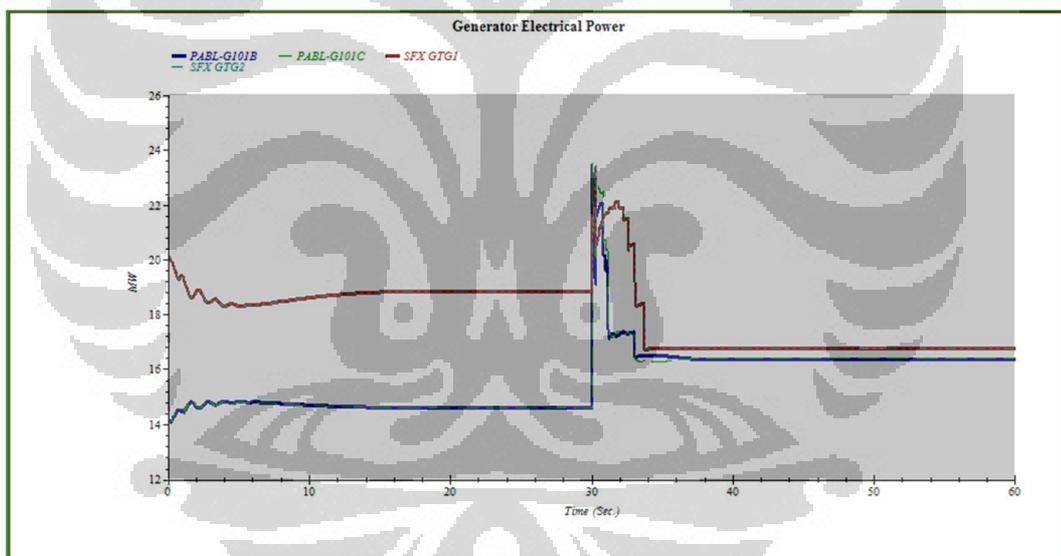
Pada skenario ini terdapat 5 unit generator G101A,G4, G9, Gen14 dan GEN 21. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.17 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika G101A, G4, G9, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	66,32	60,82	7,726	17,796	ON	5,18	9,42



Gambar 5.56 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, G9, GEN 21 dan Gen 14 Lepas



Gambar 5.57 Perubahan Daya Aktif G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan G101A, G4, G9, GEN 21 dan Gen 14 Lepas

Pada skenario ini jumlah daya aktif yang hilang dari G101A 14,82 MW, 2 x 3,5 MW dari G4 dan G9, 2 x 3 MW dari GEN 21 dan Gen 14. Pemutus tenaga di C-85 bekerja karena *under power* sehingga sistem tenaga listrik terbagi menjadi 2 area. Akibat dari putusnya kabel C-85, pembangkit unit bisnis Selatan mengalami penurunan beban yang harus disuplai sebanyak 5,38 MW. Sehingga kekurangan daya aktif yang dialami oleh sistem tenaga listrik unit bisnis Selatan Tengah

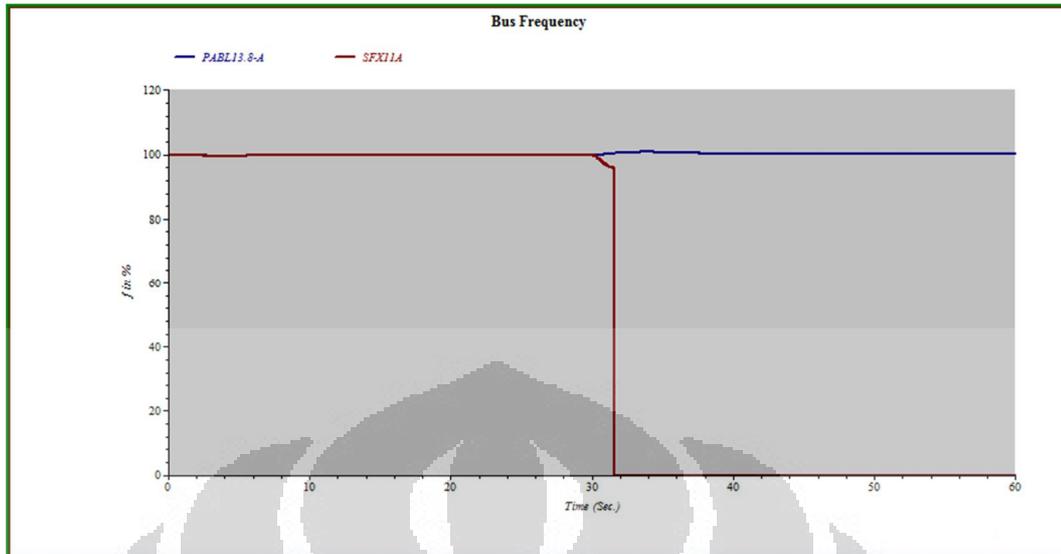
sekitar 21 MW. Sedangkan pengaruh putusnya kabel C-85 bagi sistem tenaga listrik unit bisnis Utara adalah hilangnya suplai daya aktif 5,38 MW. Sehingga total daya aktif yang hilang bagi unit bisnis Utara pada skenario ini sekitar 12 MW. Bagi pembangkit di Pabelokan hilangnya 21 MW pada skenario ini masih bisa ditutupi dengan menaikkan suplai daya aktif karena generator tersebut masih memiliki cadangan berputar. Karena generator bekerja dengan mode *isochronous load sharing*, kekurangan daya aktif sebesar 21 MW dibagi sama rata oleh G101B dan G101C sehingga daya aktif yang disuplai oleh kedua generator tersebut menjadi lebih dari 24 MW. Hal ini membuat frekuensi sistem menurun karena daya aktif maksimal yang mampu disuplai kedua generator adalah 20 MW. Begitu juga yang dialami oleh generator di Seafox, ketika terjadi gangguan pada sistem, generator di Seafox memberikan respon untuk meningkatkan daya aktif yang disuplai sesaat hingga lebih dari 24 MW. Peningkatan tersebut menyebabkan penurunan frekuensi karena daya aktif maksimal yang diperbolehkan untuk disuplai oleh generator di Seafox adalah 19 MW. Penurunan frekuensi yang terjadi pada unit bisnis Selatan Tengah mencapai 58,77 Hz sehingga diperlukan 4 tahap pelepasan beban untuk dapat mengembalikan frekuensi ke kondisi normalnya yaitu 10,454 MW. Sedangkan penurunan frekuensi yang dialami oleh unit bisnis Utara mencapai 58,42 Hz dan dibutuhkan 6 tahap pelepasan beban untuk dapat mengembalikan frekuensi ke kondisi normalnya yaitu 17,796 MW.

r. SFX GTG 1 Lepas

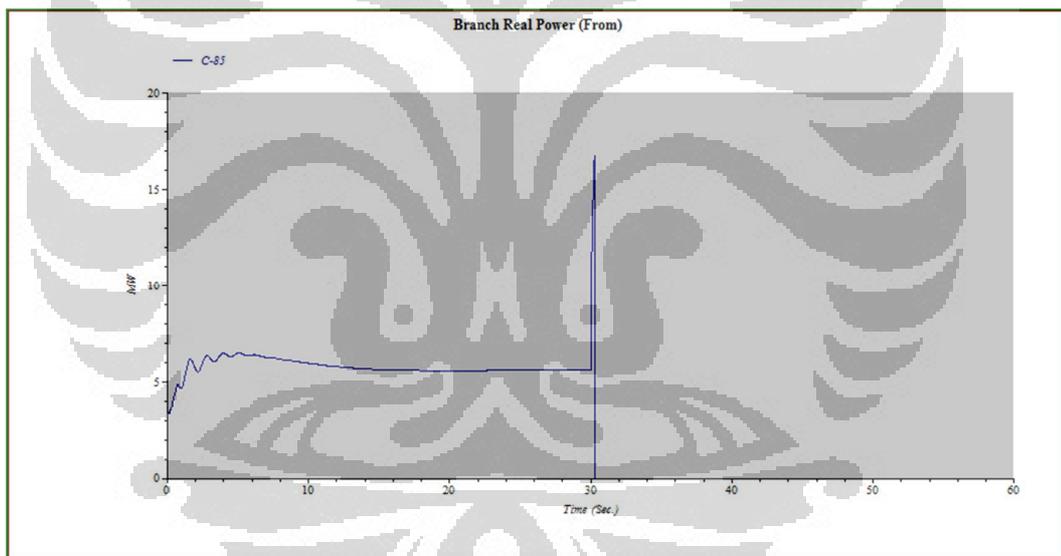
Pada skenario ini terdapat 1 unit generator SFX GTG1. Berikut ini adalah data dari beberapa komponen sistem tenaga listrik yang teramati pada saat dilakukan simulasi:

Tabel 5.18 Perubahan Perilaku Sistem Tenaga Listrik ketika SFX GTG 1 Lepas

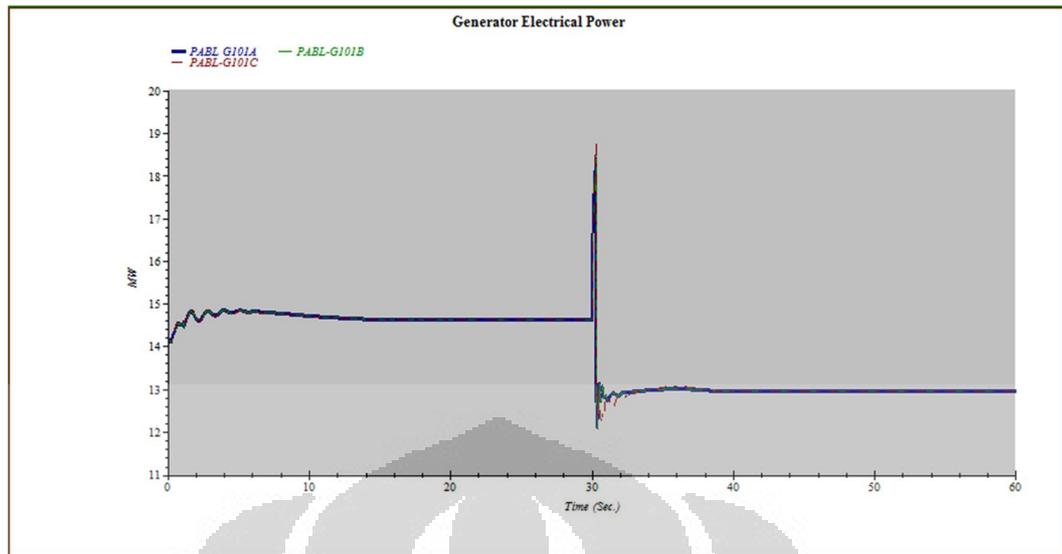
Kondisi Sebelum Gangguan		Kondisi Setelah Gangguan		Beban Lepas		Pemutus Tenaga Incoming Kara (over/under)	Waktu Pulih (s) Memasuki 59,5 Hz	
Suplai (MW)	Beban (MW)	Suplai (MW)	Beban (MW)	SCBU (MW)	NBU (MW)		SCBU	NBU
95,84	86,34	50,6	38,79	0	21,021	ON	-	BO



Gambar 5.58 Perubahan Frekuensi Sebelum dan Setelah Gangguan SFX GTG 1 Lepas



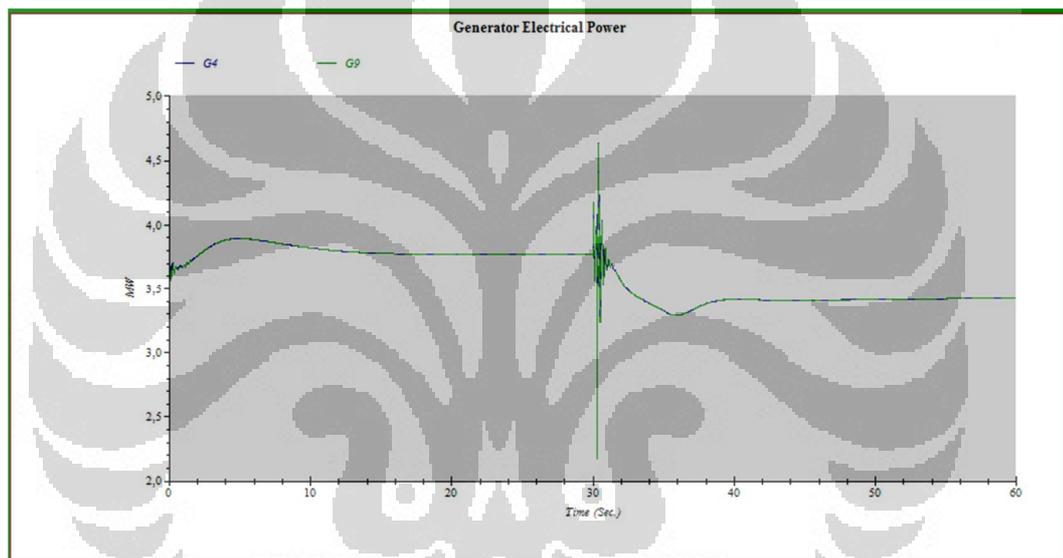
Gambar 5.59 Daya Aktif yang Melewati Kabel C-85



Gambar 5.60 Perubahan Daya Aktif G101A, G101B, G101C, SFX GTG1 dan SFX GTG2 Sebelum dan Setelah Gangguan SFX GTG1 Lepas

Pada skenario ini terdapat 1 unit generator lepas yaitu SFX GTG1 yang memiliki daya suplai maksimum 19 MW dan terletak di unit bisnis Utara. Lepasnya generator tersebut menyebabkan suplai daya yang melewati C-85 meningkat drastis karena unit bisnis Utara kehilangan banyak daya dan mampu mengaktifkan pemutus tenaga karena *over power*. Putusnya kabel C-85 menyebabkan unit bisnis Utara lebih banyak kehilangan daya. Pada masing-masing bus generator terdapat rele frekuensi yang akan mengirimkan sinyal kepada pemutus tenaga di dekat generator untuk bekerja apabila frekuensi yang terdeteksi di bus tersebut mencapai 57,6 Hz dengan waktu tunda 0,01 detik. Lepasnya SFX GTG1 menyebabkan penurunan frekuensi yang sangat drastis bagi unit bisnis Utara. Penurunan frekuensi tersebut mencapai 58,08 Hz sehingga 7 tahap pelepasan beban yang dimiliki sistem aktif semua. Hal ini tidak dapat mengembalikan frekuensi sistem ke keadaan normal dan penurunan frekuensi masih terus berlangsung hingga menyentuh nilai 57,6 Hz. Hal ini menyebabkan rele frekuensi pada semua bus generator pada unit bisnis Utara mengirimkan sinyal ke pemutus tenaga generator untuk bekerja. Sehingga pada skenario ini terjadi pemadaman total pada unit bisnis Utara. Hal ini dilakukan untuk menyelamatkan generator yang masih aktif. Berbeda dengan yang terjadi pada unit bisnis Selatan Tengah. Ketika terjadi gangguan lepasnya SFX GTG1 suplai daya yang dihasilkan oleh

generator di Pabelokan meningkat karena permintaan daya meningkat drastis. Hal ini menyebabkan pemutus tenaga C-85 bekerja, pembangkit di unit bisnis Selatan Tengah mengalami penurunan permintaan daya beban yang cukup signifikan. Hal ini membuat terjadinya lonjakan frekuensi yang berlangsung sesaat karena terjadi kelebihan suplai daya generator. Karena generator di Pabelokan bekerja dengan mode *isochronous*, generator tersebut mampu mengatur keluaran daya yang dihasilkan dan memelihara frekuensi tetap pada kondisi yang diijinkan oleh sistem. Dalam hal ini tidak terjadi pelepasan beban di unit bisnis Selatan Tengah karena frekuensi tidak turun ke titik yang dapat mengaktifkan pelepasan beban.



Gambar 5.61 Perubahan Daya Aktif G4 dan G9 Sebelum dan Setelah Gangguan SFX GTG1 Lepas

Suplai daya yang dihasilkan oleh G4 dan G9 sebelum gangguan sama dengan skenario-skenario sebelumnya yaitu 3,77 MW dan setelah gangguan daya yang dihasilkan menjadi 3,5 MW. Hal ini sesuai dengan pengaturan yang diberikan kepada generator tersebut yaitu *droop* 3,5 MW.

KESIMPULAN

Setelah melakukan beberapa perhitungan dan simulasi berkaitan dengan pelepasan beban menggunakan rele frekuensi pada CNOOC SES Ltd. dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu:

- a. Skema pelepasan beban akibat penurunan frekuensi pada CNOOC SES Ltd. adalah sebagai berikut:

Tahap	Frekuensi (Hz)	Beban Lepas	Waktu Tunda (s)	Beban SCBU (kW)	Beban NBU (kW)
1	59,5	Krisna – A Cinta – F Wanda – A Karmila – A Cinta – E Vita – A Widuri – G	2,5	2190	3008,9
2	59,3	Rama – F Selatan – A Nora – A Rama – C Cinta – H NEIAC Widuri – F Widuri – H	0,1	2474	2915,6
3	59,15	Sundari – A Rama – A Windri – A	0,1	1367	975,6
4	59	Cinta – C Cinta – A Widuri – E	0,1	1695	1517
5	58,75	Rama – G Krisna – C Kartini – A Cinta D Kitty – A Rama – B Cinta – G Intan – B	0,1	2728	4244,32
6	58,5	Aida - A Farida – B Indri - A	0,01	334	5134,9
7	58,35	Widuri – C Krisna – E Titi – A	0,01	321	3225,06

- b. Penggunaan rele frekuensi sebagai divais untuk mendeteksi adanya penurunan frekuensi akibat beban lebih karena generator lepas pada suatu sistem tenaga listrik memiliki kemampuan yang cukup baik dalam rangka upaya pemulihan frekuensi. Namun terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu penggunaan persamaan *swing* generator untuk mendapatkan frekuensi kerja rele yang tepat dan besar beban yang dilepaskan sesuai dengan kebutuhan sistem tersebut serta pemilihan waktu tunda rele yang dapat mempengaruhi pengaktifan skema pelepasan beban.
- c. Pengaruh pemilihan waktu tunda rele terlihat jelas pada simulasi, yaitu ketika terjadi kehilangan suplai daya aktif sekitar 6-8 MW, waktu tunda rele yang dipilih membuat tidak terjadi pelepasan beban karena frekuensi dapat pulih dengan sendirinya selama kurang lebih 2 detik. Sedangkan ketika sistem kehilangan daya sekitar 10 MW frekuensi dapat pulih dengan sendirinya selama kurang lebih 10 detik, namun pada sistem ini pelepasan beban terjadi karena waktu tunda maksimum yang diijinkan rele sekitar 2,5 detik.
- d. Nilai konstanta inersia suatu generator mempengaruhi kerja generator dalam menghasilkan suplai daya aktif. Ketika terjadi gangguan generator lepas yang mengakibatkan penurunan frekuensi karena sistem kekurangan suplai daya aktif, generator dengan nilai konstanta inersia lebih kecil dan bekerja dengan pengaturan governor *droop* mengalami ketidakstabilan dengan menghasilkan peningkatan suplai daya aktif lebih besar daripada yang seharusnya disuplai untuk memenuhi kekurangan suplai daya aktif tersebut.

DAFTAR REFERENSI

- Azmi, Ulil. 2008. PLTG. <http://www.ccitonline.com/mekanikal/tiki-index.php?page=PLTG>
- A Status Report On Methods Used For System Preservation During Underfrequency Condition.* (1975). New York: IEEE Committe Report.
- Chapman, Stephen J. (2002). *Electrical Machinery Fundamental*. New York: McGraw-Hill.
- Gers, Juan M., and Edward J. Holmes. (2004). *Protection of Electricity Distribution Network*. London: The Institution of Electrical.
- Hidayat, Fani Irfan. (2004). *Simulasi Pelepasan Beban Pada Sistem Tenaga Listrik*. Depok: Departemen Elektro Fakultas Teknik UI.
- IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants.* (2003). New York: IEEE The Institute of Electrical and Electrical Engineers Inc.
- Lokay, H.E., and and V. Burtnyk. (1968). *Application of Underfrequency Relays for Automatic Load Shedding*.
- Yuli, Asiffudin. (1998). *Studi Aplikasi Pelepasan Beban Pada Penurunan Frekuensi Sistem Tenaga Listrik*. Depok: Jurusan Elektro Fakultas Teknik UI.

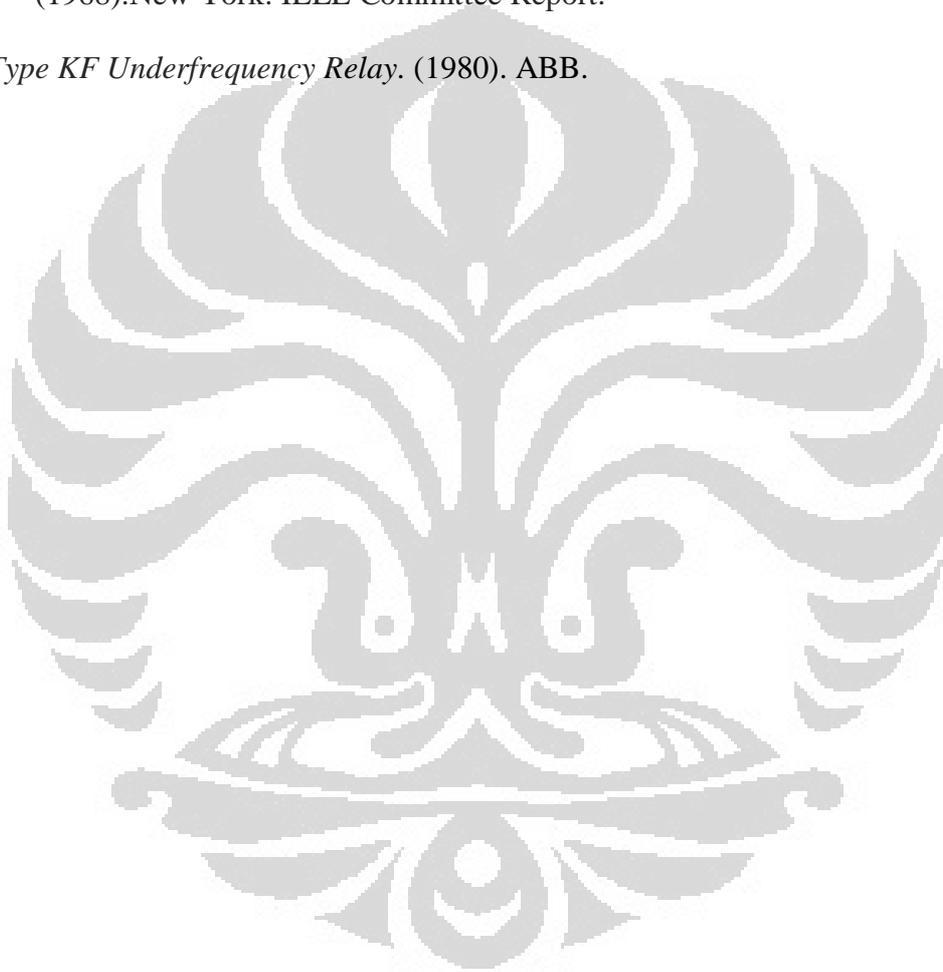
DAFTAR PUSTAKA

Instructions Type SDF-1 Solid State Underfrequency Relay. (1974). Westinghouse.

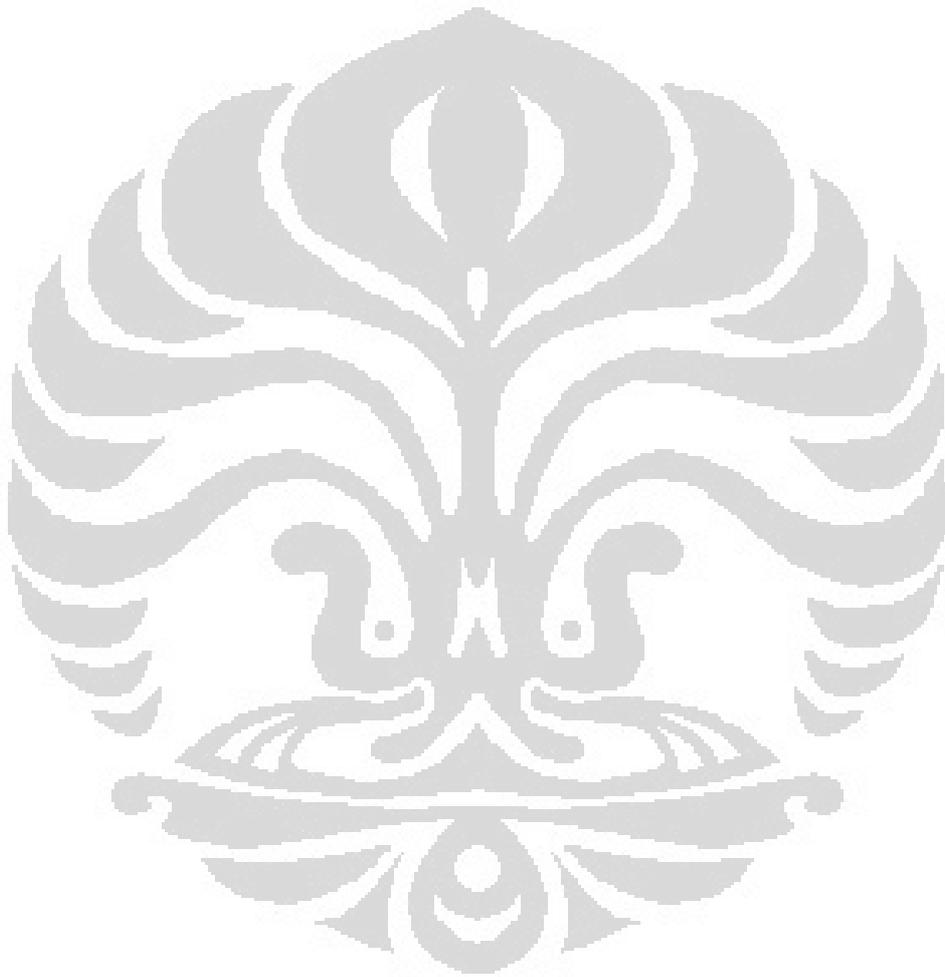
Karim, Khairuddin., Adi Soeprijanto, Mauridhi Hery Purnomo. (2008). *Pelepasan Beban Otomatis Menggunakan ANN-CBP-FLC Pada Sistem Tenaga Listrik Industri Besar.* Yogyakarta: Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi.

Survey of Underfrequency Relay Tripping of Under Emergency Conditions. (1968). New York: IEEE Committee Report.

Type KF Underfrequency Relay. (1980). ABB.



LAMPIRAN



Perhitungan Variasi Penurunan Frekuensi per Detik dari Kombinasi Generator Lepas

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	Total Beban	Total Suplai	Kelebihan beban (kW)	MW	df/dt
14824	14824	14824	3500	3500	3000	3000	19000	19000	95472	95472	0	0	0
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	19000	19000	95472	91000	4472	4,472	-1,24893
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	19000	19000	95472	87500	7972	7,972	-2,2264
0	20000	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	95472	84000	11472	11,472	-3,20387
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	19000	19000	95472	88000	7472	7,472	-2,08676
0	20000	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	95472	85000	10472	10,472	-2,9246
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	95472	72000	23472	23,472	-6,5552
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	95472	53000	42472	42,472	-11,8615
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	19000	19000	95472	71000	24472	24,472	-6,83448
0	0	20000	0	3500	3000	3000	19000	19000	95472	67500	27972	27,972	-7,81195
0	0	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	95472	64000	31472	31,472	-8,78942
0	0	20000	3500	3500	0	3000	19000	19000	95472	68000	27472	27,472	-7,67231
0	0	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	95472	65000	30472	30,472	-8,51015
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	95472	52000	43472	43,472	-12,1408
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	0	95472	29500	65972	65,972	-18,4245
16272	16272	16272	0	3500	3000	3000	19000	19000	95472	96317	-845	-0,845	0,23599
17501	17500	17501	0	0	3000	3000	19000	19000	95472	96502	-1030	-1,03	0,287656
17366	17366	17366	0	3500	0	3000	19000	19000	95472	96598	-1126	-1,126	0,314467
20000	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	95472	88500	6972	6,972	-1,94712
18595	18594	18594	0	0	0	3000	19000	19000	95472	96783	-1311	-1,311	0,366133
18460	18460	18459	0	3500	0	0	19000	19000	95472	96879	-1407	-1,407	0,392944
20000	20000	20000	0	3500	0	3000	0	19000	95472	85500	9972	9,972	-2,78496
20000	20000	20000	0	0	3000	3000	0	19000	95472	85000	10472	10,472	-2,9246
20000	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	0	95472	69500	25972	25,972	-7,2534
19688	19688	19688	0	0	0	0	19000	19000	95472	97064	-1592	-1,592	0,44461
20000	20000	20000	0	0	0	3000	0	19000	95472	82000	13472	13,472	-3,76243
20000	20000	20000	0	0	3000	3000	0	0	95472	66000	29472	29,472	-8,23087
20000	20000	20000	0	3500	0	3000	0	0	95472	66500	28972	28,972	-8,09123
20000	20000	20000	0	0	0	3000	0	0	95472	63000	32472	32,472	-9,0687
20000	20000	20000	0	0	0	0	0	19000	95472	79000	16472	16,472	-4,60026

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	Total Beban	Total Suplai	Kelebihan beban (kW)	MW	df/dt
20000	20000	20000	0	3685	0	0	0	0	95472	63685	31787	31,787	-8,8774
20000	20000	20000	0	0	0	0	0	0	95472	60000	35472	35,472	-9,90654
16138	16138	16137	3500	3500	0	3000	19000	19000	95472	96413	-941	-0,941	0,2628
17232	17231	17231	3500	3500	0	0	19000	19000	95472	96694	-1222	-1,222	0,341277
20000	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	95472	89000	6472	6,472	-1,80748
20000	20000	20000	3500	3500	0	0	0	19000	95472	86000	9472	9,472	-2,64532
20000	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	0	95472	70000	25472	25,472	-7,11376
20000	20000	20000	3500	3500	0	0	0	0	95472	67000	28472	28,472	-7,95159
20000	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	95472	92000	3472	3,472	-0,96965
20000	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	95472	73000	22472	22,472	-6,27593
0	20000	20000	0	3500	0	3000	19000	19000	95472	84500	10972	10,972	-3,06423
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	95472	68500	26972	26,972	-7,53268
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	95472	69000	26472	26,472	-7,39304
0	20000	20000	0	0	0	3000	19000	19000	95472	81000	14472	14,472	-4,04171
0	20000	20000	0	0	3281	3000	0	19000	95472	65281	30191	30,191	-8,43167
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	0	95472	49500	45972	45,972	-12,8389
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	0	95472	50000	45472	45,472	-12,6993
0	20000	20000	0	3500	0	3000	0	19000	95472	65500	29972	29,972	-8,37051
0	20000	20000	3500	3500	0	0	0	19000	95472	66000	29472	29,472	-8,23087
0	20000	20000	0	3500	0	0	19000	19000	95472	81500	13972	13,972	-3,90207
0	20000	20000	0	0	0	0	19000	19000	95472	78000	17472	17,472	-4,87954
0	20000	20000	0	3500	0	0	0	19000	95472	62500	32972	32,972	-9,20834
0	20000	20000	0	3500	0	3000	0	0	95472	46500	48972	48,972	-13,6768
0	20000	20000	3500	3500	0	0	0	0	95472	47000	48472	48,472	-13,5371
0	20000	20000	0	0	3000	3000	0	0	95472	46000	49472	49,472	-13,8164
0	20000	20000	0	0	0	3000	0	19000	95472	62000	33472	33,472	-9,34798
0	20000	20000	0	0	0	0	0	19000	95472	59000	36472	36,472	-10,1858
0	20000	20000	0	0	0	3000	0	0	95472	43000	52472	52,472	-14,6543
0	20000	20000	0	3500	0	0	0	0	95472	43500	51972	51,972	-14,5146
0	20000	20000	0	0	0	0	0	0	95472	40000	55472	55,472	-15,4921
0	0	20000	0	3500	0	3000	19000	19000	95472	64500	30972	30,972	-8,64979
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	95472	48500	46972	46,972	-13,1182

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	Total Beban	Total Suplai	Kelebihan beban (kW)	MW	df/dt
0	0	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	95472	49000	46472	46,472	-12,9786
0	0	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	95472	64000	31472	31,472	-8,78942
0	0	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	95472	65000	30472	30,472	-8,51015
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	95472	33000	62472	62,472	-17,447
0	0	20000	0	0	0	3000	19000	19000	95472	61000	34472	34,472	-9,62726
0	0	20000	0	0	3000	3000	0	19000	95472	45000	50472	50,472	-14,0957
0	0	20000	0	3500	0	0	19000	19000	95472	61500	33972	33,972	-9,48762
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	0	95472	29500	65972	65,972	-18,4245
0	0	20000	3500	3500	0	0	0	19000	95472	46000	49472	49,472	-13,8164
0	0	20000	3500	3500	0	3000	0	0	95472	30000	65472	65,472	-18,2849
0	0	20000	0	0	0	3000	19000	19000	95472	61000	34472	34,472	-9,62726
0	0	20000	0	0	0	0	19000	19000	95472	58000	37472	37,472	-10,4651
0	0	20000	0	3500	0	3000	0	0	95472	26500	68972	68,972	-19,2623
0	0	20000	0	3500	0	0	0	19000	95472	42500	52972	52,972	-14,7939
0	0	20000	3500	3500	0	0	0	0	95472	27000	68472	68,472	-19,1227
0	0	20000	0	0	3000	3000	0	0	95472	26000	69472	69,472	-19,402
0	0	20000	0	0	0	0	0	19000	95472	39000	56472	56,472	-15,7714
0	0	20000	0	0	3000	0	0	0	95472	23000	72472	72,472	-20,2398
0	0	20000	0	3500	0	0	0	0	95472	23500	71972	71,972	-20,1002
0	0	20000	0	0	0	0	0	0	95472	20000	75472	75,472	-21,0776

Perhitungan Waktu Trip dari Kombinasi Generator Lepas

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	df/dt	f ₀ - f ₁	t pick-up	t CB	t rele	t trip
14824	14824	14824	3500	3500	3000	3000	19000	19000	0	0	0,5	0	0	0	0
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	19000	19000	4,472	-1,24893	0,5	0,400343	0,1	0,05	0,550343
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	19000	19000	7,972	-2,2264	0,5	0,224578	0,1	0,05	0,374578
0	20000	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	11,472	-3,20387	0,5	0,156061	0,1	0,05	0,306061
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	19000	19000	7,472	-2,08676	0,5	0,239606	0,1	0,05	0,389606
0	20000	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	10,472	-2,9246	0,5	0,170964	0,1	0,05	0,320964
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	23,472	-6,5552	0,5	0,076275	0,1	0,05	0,226275
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	42,472	-11,8615	0,5	0,042153	0,1	0,05	0,192153
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	19000	19000	24,472	-6,83448	0,5	0,073158	0,1	0,05	0,223158
0	0	20000	0	3500	3000	3000	19000	19000	27,972	-7,81195	0,5	0,064004	0,1	0,05	0,214004
0	0	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	31,472	-8,78942	0,5	0,056887	0,1	0,05	0,206887
0	0	20000	3500	3500	0	3000	19000	19000	27,472	-7,67231	0,5	0,065169	0,1	0,05	0,215169
0	0	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	30,472	-8,51015	0,5	0,058753	0,1	0,05	0,208753
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	43,472	-12,1408	0,5	0,041184	0,1	0,05	0,191184
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	0	65,972	-18,4245	0,5	0,027138	0,1	0,05	0,177138
16272	16272	16272	0	3500	3000	3000	19000	19000	-0,845	0,23599	0,5	-2,11874	0,1	0,05	-1,96874
17501	17500	17501	0	0	3000	3000	19000	19000	-1,03	0,287656	0,5	-1,73819	0,1	0,05	-1,58819
17366	17366	17366	0	3500	0	3000	19000	19000	-1,126	0,314467	0,5	-1,58999	0,1	0,05	-1,43999
20000	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	6,972	-1,94712	0,5	0,256789	0,1	0,05	0,406789
18595	18594	18594	0	0	0	3000	19000	19000	-1,311	0,366133	0,5	-1,36562	0,1	0,05	-1,21562
18460	18460	18459	0	3500	0	0	19000	19000	-1,407	0,392944	0,5	-1,27245	0,1	0,05	-1,12245
20000	20000	20000	0	3500	0	3000	0	19000	9,972	-2,78496	0,5	0,179536	0,1	0,05	0,329536
20000	20000	20000	0	0	3000	3000	0	19000	10,472	-2,9246	0,5	0,170964	0,1	0,05	0,320964
20000	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	0	25,972	-7,2534	0,5	0,068933	0,1	0,05	0,218933
19688	19688	19688	0	0	0	0	19000	19000	-1,592	0,44461	0,5	-1,12458	0,1	0,05	-0,97458
20000	20000	20000	0	0	0	3000	0	19000	13,472	-3,76243	0,5	0,132893	0,1	0,05	0,282893
20000	20000	20000	0	0	3000	3000	0	0	29,472	-8,23087	0,5	0,060747	0,1	0,05	0,210747
20000	20000	20000	0	3500	0	3000	0	0	28,972	-8,09123	0,5	0,061795	0,1	0,05	0,211795
20000	20000	20000	0	0	0	3000	0	0	32,472	-9,0687	0,5	0,055135	0,1	0,05	0,205135
20000	20000	20000	0	0	0	0	0	19000	16,472	-4,60026	0,5	0,108689	0,1	0,05	0,258689

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	df/dt	fo - f1	t pick-up	t CB	t rele	t trip
20000	20000	20000	0	3685	0	0	0	0	31,787	-8,8774	0,5	0,056323	0,1	0,05	0,206323
20000	20000	20000	0	0	0	0	0	0	35,472	-9,90654	0,5	0,050472	0,1	0,05	0,200472
16138	16138	16137	3500	3500	0	3000	19000	19000	-0,941	0,2628	0,5	-1,90259	0,1	0,05	-1,75259
17232	17231	17231	3500	3500	0	0	19000	19000	-1,222	0,341277	0,5	-1,46508	0,1	0,05	-1,31508
20000	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	6,472	-1,80748	0,5	0,276628	0,1	0,05	0,426628
20000	20000	20000	3500	3500	0	0	0	19000	9,472	-2,64532	0,5	0,189013	0,1	0,05	0,339013
20000	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	0	25,472	-7,11376	0,5	0,070286	0,1	0,05	0,220286
20000	20000	20000	3500	3500	0	0	0	0	28,472	-7,95159	0,5	0,06288	0,1	0,05	0,21288
20000	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	3,472	-0,96965	0,5	0,515649	0,1	0,05	0,665649
20000	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	22,472	-6,27593	0,5	0,07967	0,1	0,05	0,22967
0	20000	20000	0	3500	0	3000	19000	19000	10,972	-3,06423	0,5	0,163173	0,1	0,05	0,313173
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	26,972	-7,53268	0,5	0,066377	0,1	0,05	0,216377
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	26,472	-7,39304	0,5	0,067631	0,1	0,05	0,217631
0	20000	20000	0	0	0	3000	19000	19000	14,472	-4,04171	0,5	0,12371	0,1	0,05	0,27371
0	20000	20000	0	0	3281	3000	0	19000	30,191	-8,43167	0,5	0,0593	0,1	0,05	0,2093
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	0	45,972	-12,8389	0,5	0,038944	0,1	0,05	0,188944
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	0	45,472	-12,6993	0,5	0,039372	0,1	0,05	0,189372
0	20000	20000	0	3500	0	3000	0	19000	29,972	-8,37051	0,5	0,059734	0,1	0,05	0,209734
0	20000	20000	3500	3500	0	0	0	19000	29,472	-8,23087	0,5	0,060747	0,1	0,05	0,210747
0	20000	20000	0	3500	0	0	19000	19000	13,972	-3,90207	0,5	0,128137	0,1	0,05	0,278137
0	20000	20000	0	0	0	0	19000	19000	17,472	-4,87954	0,5	0,102469	0,1	0,05	0,252469
0	20000	20000	0	3500	0	0	0	19000	32,972	-9,20834	0,5	0,054299	0,1	0,05	0,204299
0	20000	20000	0	3500	0	3000	0	0	48,972	-13,6768	0,5	0,036558	0,1	0,05	0,186558
0	20000	20000	3500	3500	0	0	0	0	48,472	-13,5371	0,5	0,036935	0,1	0,05	0,186935
0	20000	20000	0	0	3000	3000	0	0	49,472	-13,8164	0,5	0,036189	0,1	0,05	0,186189
0	20000	20000	0	0	0	3000	0	19000	33,472	-9,34798	0,5	0,053487	0,1	0,05	0,203487
0	20000	20000	0	0	0	0	0	19000	36,472	-10,1858	0,5	0,049088	0,1	0,05	0,199088
0	20000	20000	0	0	0	3000	0	0	52,472	-14,6543	0,5	0,03412	0,1	0,05	0,18412
0	20000	20000	0	3500	0	0	0	0	51,972	-14,5146	0,5	0,034448	0,1	0,05	0,184448
0	20000	20000	0	0	0	0	0	0	55,472	-15,4921	0,5	0,032275	0,1	0,05	0,182275
0	0	20000	0	3500	0	3000	19000	19000	30,972	-8,64979	0,5	0,057805	0,1	0,05	0,207805
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	46,972	-13,1182	0,5	0,038115	0,1	0,05	0,188115

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	df/dt	fo - f1	t pick-up	t CB	t rele	t trip
0	0	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	46,472	-12,9786	0,5	0,038525	0,1	0,05	0,188525
0	0	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	31,472	-8,78942	0,5	0,056887	0,1	0,05	0,206887
0	0	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	30,472	-8,51015	0,5	0,058753	0,1	0,05	0,208753
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	62,472	-17,447	0,5	0,028658	0,1	0,05	0,178658
0	0	20000	0	0	0	3000	19000	19000	34,472	-9,62726	0,5	0,051936	0,1	0,05	0,201936
0	0	20000	0	0	3000	3000	0	19000	50,472	-14,0957	0,5	0,035472	0,1	0,05	0,185472
0	0	20000	0	3500	0	0	19000	19000	33,972	-9,48762	0,5	0,0527	0,1	0,05	0,2027
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	0	65,972	-18,4245	0,5	0,027138	0,1	0,05	0,177138
0	0	20000	3500	3500	0	0	0	19000	49,472	-13,8164	0,5	0,036189	0,1	0,05	0,186189
0	0	20000	3500	3500	0	3000	0	0	65,472	-18,2849	0,5	0,027345	0,1	0,05	0,177345
0	0	20000	0	0	0	3000	19000	19000	34,472	-9,62726	0,5	0,051936	0,1	0,05	0,201936
0	0	20000	0	0	0	0	19000	19000	37,472	-10,4651	0,5	0,047778	0,1	0,05	0,197778
0	0	20000	0	3500	0	3000	0	0	68,972	-19,2623	0,5	0,025957	0,1	0,05	0,175957
0	0	20000	0	3500	0	0	0	19000	52,972	-14,7939	0,5	0,033798	0,1	0,05	0,183798
0	0	20000	3500	3500	0	0	0	0	68,472	-19,1227	0,5	0,026147	0,1	0,05	0,176147
0	0	20000	0	0	3000	3000	0	0	69,472	-19,402	0,5	0,025771	0,1	0,05	0,175771
0	0	20000	0	0	0	0	0	19000	56,472	-15,7714	0,5	0,031703	0,1	0,05	0,181703
0	0	20000	0	0	3000	0	0	0	72,472	-20,2398	0,5	0,024704	0,1	0,05	0,174704
0	0	20000	0	3500	0	0	0	0	71,972	-20,1002	0,5	0,024875	0,1	0,05	0,174875
0	0	20000	0	0	0	0	0	0	75,472	-21,0776	0,5	0,023722	0,1	0,05	0,173722

Perhitungan Frekuensi Saat Pemutus Tenaga Bekerja pada Setiap Kombinasi Generator Lepas

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	df/dt	t trip	f beban lepas
14824	14824	14824	3500	3500	3000	3000	19000	19000	-	-	-	-
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	19000	19000	4,472	-1,24893	0,550343	59,31266058
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	19000	19000	7,972	-2,2264	0,374578	59,16603984
0	20000	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	11,472	-3,20387	0,306061	59,0194191
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	19000	19000	7,472	-2,08676	0,389606	59,18698566
0	20000	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	10,472	-2,9246	0,320964	59,06131074
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	23,472	-6,5552	0,226275	58,51671942
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	42,472	-11,8615	0,192153	57,72077825
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	19000	19000	24,472	-6,83448	0,223158	58,47482778
0	0	20000	0	3500	3000	3000	19000	19000	27,972	-7,81195	0,214004	58,32820704
0	0	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	31,472	-8,78942	0,206887	58,1815863
0	0	20000	3500	3500	0	3000	19000	19000	27,472	-7,67231	0,215169	58,34915286
0	0	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	30,472	-8,51015	0,208753	58,22347794
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	43,472	-12,1408	0,191184	57,67888661
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	0	65,972	-18,4245	0,177138	56,73632471
16272,4	16272,3	16272,3	0	3500	3000	3000	19000	19000	-0,845	0,23599	-1,96874	59,53539844
17501	17500	17501	0	0	3000	3000	19000	19000	-1,03	0,287656	-1,58819	59,54314839
17366	17366	17366	0	3500	0	3000	19000	19000	-1,126	0,314467	-1,43999	59,54716999
20000	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	6,972	-1,94712	0,406789	59,20793148
18595	18594	18594	0	0	0	3000	19000	19000	-1,311	0,366133	-1,21562	59,55491994
18460	18460	18459	0	3500	0	0	19000	19000	-1,407	0,392944	-1,12245	59,55894154
20000	20000	20000	0	3500	0	3000	0	19000	9,972	-2,78496	0,329536	59,08225656
20000	20000	20000	0	0	3000	3000	0	19000	10,472	-2,9246	0,320964	59,06131074
20000	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	0	25,972	-7,2534	0,218933	58,41199032
19688	19688	19688	0	0	0	0	19000	19000	-1,592	0,44461	-0,97458	59,56669149
20000	20000	20000	0	0	0	3000	0	19000	13,472	-3,76243	0,282893	58,93563582
20000	20000	20000	0	0	3000	3000	0	0	29,472	-8,23087	0,210747	58,26536958
20000	20000	20000	0	3500	0	3000	0	0	28,972	-8,09123	0,211795	58,2863154
20000	20000	20000	0	0	0	3000	0	0	32,472	-9,0687	0,205135	58,13969466
20000	20000	20000	0	0	0	0	0	19000	16,472	-4,60026	0,258689	58,8099609

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	df/dt	t trip	f beban lepas
20000	20000	20000	0	3685	0	0	0	0	31,787	-8,8774	0,206323	58,16839043
20000	20000	20000	0	0	0	0	0	0	35,472	-9,90654	0,200472	58,01401974
16138	16138	16137	3500	3500	0	3000	19000	19000	-0,941	0,2628	-1,75259	59,53942003
17232	17231	17231	3500	3500	0	0	19000	19000	-1,222	0,341277	-1,31508	59,55119158
20000	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	6,472	-1,80748	0,426628	59,2288773
20000	20000	20000	3500	3500	0	0	0	19000	9,472	-2,64532	0,339013	59,10320238
20000	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	0	25,472	-7,11376	0,220286	58,43293614
20000	20000	20000	3500	3500	0	0	0	0	28,472	-7,95159	0,21288	58,30726122
20000	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	3,472	-0,96965	0,665649	59,35455222
20000	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	22,472	-6,27593	0,22967	58,55861106
0	20000	20000	0	3500	0	3000	19000	19000	10,972	-3,06423	0,313173	59,04036492
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	26,972	-7,53268	0,216377	58,37009868
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	26,472	-7,39304	0,217631	58,3910445
0	20000	20000	0	0	0	3000	19000	19000	14,472	-4,04171	0,27371	58,89374418
0	20000	20000	0	0	3281	3000	0	19000	30,191	-8,43167	0,2093	58,23524949
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	0	45,972	-12,8389	0,188944	57,57415751
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	0	45,472	-12,6993	0,189372	57,59510333
0	20000	20000	0	3500	0	3000	0	19000	29,972	-8,37051	0,209734	58,24442376
0	20000	20000	3500	3500	0	0	0	19000	29,472	-8,23087	0,210747	58,26536958
0	20000	20000	0	3500	0	0	19000	19000	13,972	-3,90207	0,278137	58,91469
0	20000	20000	0	0	0	0	19000	19000	17,472	-4,87954	0,252469	58,76806926
0	20000	20000	0	3500	0	0	0	19000	32,972	-9,20834	0,204299	58,11874884
0	20000	20000	0	3500	0	3000	0	0	48,972	-13,6768	0,186558	57,44848259
0	20000	20000	3500	3500	0	0	0	0	48,472	-13,5371	0,186935	57,46942841
0	20000	20000	0	0	3000	3000	0	0	49,472	-13,8164	0,186189	57,42753677
0	20000	20000	0	0	0	3000	0	19000	33,472	-9,34798	0,203487	58,09780302
0	20000	20000	0	0	0	0	0	19000	36,472	-10,1858	0,199088	57,9721281
0	20000	20000	0	0	0	3000	0	0	52,472	-14,6543	0,18412	57,30186185
0	20000	20000	0	3500	0	0	0	0	51,972	-14,5146	0,184448	57,32280767
0	20000	20000	0	0	0	0	0	0	55,472	-15,4921	0,182275	57,17618693
0	0	20000	0	3500	0	3000	19000	19000	30,972	-8,64979	0,207805	58,20253212
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	46,972	-13,1182	0,188115	57,53226587

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	df/dt	t trip	f beban lepas
0	0	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	46,472	-12,9786	0,188525	57,55321169
0	0	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	31,472	-8,78942	0,206887	58,1815863
0	0	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	30,472	-8,51015	0,208753	58,22347794
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	62,472	-17,447	0,178658	56,88294545
0	0	20000	0	0	0	3000	19000	19000	34,472	-9,62726	0,201936	58,05591138
0	0	20000	0	0	3000	3000	0	19000	50,472	-14,0957	0,185472	57,38564513
0	0	20000	0	3500	0	0	19000	19000	33,972	-9,48762	0,2027	58,0768572
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	0	65,972	-18,4245	0,177138	56,73632471
0	0	20000	3500	3500	0	0	0	19000	49,472	-13,8164	0,186189	57,42753677
0	0	20000	3500	3500	0	3000	0	0	65,472	-18,2849	0,177345	56,75727053
0	0	20000	0	0	0	3000	19000	19000	34,472	-9,62726	0,201936	58,05591138
0	0	20000	0	0	0	0	19000	19000	37,472	-10,4651	0,197778	57,93023646
0	0	20000	0	3500	0	3000	0	0	68,972	-19,2623	0,175957	56,61064979
0	0	20000	0	3500	0	0	0	19000	52,972	-14,7939	0,183798	57,28091603
0	0	20000	3500	3500	0	0	0	0	68,472	-19,1227	0,176147	56,63159561
0	0	20000	0	0	3000	3000	0	0	69,472	-19,402	0,175771	56,58970397
0	0	20000	0	0	0	0	0	19000	56,472	-15,7714	0,181703	57,13429529
0	0	20000	0	0	3000	0	0	0	72,472	-20,2398	0,174704	56,46402904
0	0	20000	0	3500	0	0	0	0	71,972	-20,1002	0,174875	56,48497487
0	0	20000	0	0	0	0	0	0	75,472	-21,0776	0,173722	56,33835412

Perhitungan Laju Pemulihan Frekuensi yang Harus Dihasilkan dengan Waktu 5 detik dari Setiap Kombinasi Generator Lepas

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	f beban lepas	Δf	df/dt pemulihan
14824	14824	14824	3500	3500	3000	3000	19000	19000	-	-		
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	19000	19000	4,472	59,31266058	0,687339	0,137467883
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	19000	19000	7,972	59,16603984	0,83396	0,166792031
0	20000	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	11,472	59,0194191	0,980581	0,196116179
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	19000	19000	7,472	59,18698566	0,813014	0,162602867
0	20000	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	10,472	59,06131074	0,938689	0,187737851
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	23,472	58,51671942	1,483281	0,296656116
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	42,472	57,72077825	2,279222	0,455844349
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	19000	19000	24,472	58,47482778	1,525172	0,305034444
0	0	20000	0	3500	3000	3000	19000	19000	27,972	58,32820704	1,671793	0,334358592
0	0	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	31,472	58,1815863	1,818414	0,363682741
0	0	20000	3500	3500	0	3000	19000	19000	27,472	58,34915286	1,650847	0,330169428
0	0	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	30,472	58,22347794	1,776522	0,355304413
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	43,472	57,67888661	2,321113	0,464222677
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	0	65,972	56,73632471	3,263675	0,652735059
16272,4	16272,3	16272,3	0	3500	3000	3000	19000	19000	-0,845	59,53539844	0,464602	0,092920313
17501	17500	17501	0	0	3000	3000	19000	19000	-1,03	59,54314839	0,456852	0,091370322
17366	17366	17366	0	3500	0	3000	19000	19000	-1,126	59,54716999	0,45283	0,090566003
20000	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	6,972	59,20793148	0,792069	0,158413703
18595	18594	18594	0	0	0	3000	19000	19000	-1,311	59,55491994	0,44508	0,089016012
18460	18460	18459	0	3500	0	0	19000	19000	-1,407	59,55894154	0,441058	0,088211692
20000	20000	20000	0	3500	0	3000	0	19000	9,972	59,08225656	0,917743	0,183548687
20000	20000	20000	0	0	3000	3000	0	19000	10,472	59,06131074	0,938689	0,187737851
20000	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	0	25,972	58,41199032	1,58801	0,317601936
19688	19688	19688	0	0	0	0	19000	19000	-1,592	59,56669149	0,433309	0,086661702
20000	20000	20000	0	0	0	3000	0	19000	13,472	58,93563582	1,064364	0,212872836
20000	20000	20000	0	0	3000	3000	0	0	29,472	58,26536958	1,73463	0,346926085
20000	20000	20000	0	3500	0	3000	0	0	28,972	58,2863154	1,713685	0,34273692
20000	20000	20000	0	0	0	3000	0	0	32,472	58,13969466	1,860305	0,372061069
20000	20000	20000	0	0	0	0	0	19000	16,472	58,8099609	1,190039	0,23800782

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	f beban lepas	Δf	df/dt pemulihan
20000	20000	20000	0	3685	0	0	0	0	31,787	58,16839043	1,83161	0,366321914
20000	20000	20000	0	0	0	0	0	0	35,472	58,01401974	1,98598	0,397196053
16138	16138	16137	3500	3500	0	3000	19000	19000	-0,941	59,53942003	0,46058	0,092115993
17232	17231	17231	3500	3500	0	0	19000	19000	-1,222	59,55119158	0,448808	0,089761683
20000	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	6,472	59,2288773	0,771123	0,154224539
20000	20000	20000	3500	3500	0	0	0	19000	9,472	59,10320238	0,896798	0,179359523
20000	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	0	25,472	58,43293614	1,567064	0,313412772
20000	20000	20000	3500	3500	0	0	0	0	28,472	58,30726122	1,692739	0,338547756
20000	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	3,472	59,35455222	0,645448	0,129089555
20000	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	22,472	58,55861106	1,441389	0,288277788
0	20000	20000	0	3500	0	3000	19000	19000	10,972	59,04036492	0,959635	0,191927015
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	26,972	58,37009868	1,629901	0,325980264
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	26,472	58,3910445	1,608956	0,3217911
0	20000	20000	0	0	0	3000	19000	19000	14,472	58,89374418	1,106256	0,221251164
0	20000	20000	0	0	3281	3000	0	19000	30,191	58,23524949	1,764751	0,352950102
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	0	45,972	57,57415751	2,425842	0,485168497
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	0	45,472	57,59510333	2,404897	0,480979333
0	20000	20000	0	3500	0	3000	0	19000	29,972	58,24442376	1,755576	0,351115249
0	20000	20000	3500	3500	0	0	0	19000	29,472	58,26536958	1,73463	0,346926085
0	20000	20000	0	3500	0	0	19000	19000	13,972	58,91469	1,08531	0,217062
0	20000	20000	0	0	0	0	19000	19000	17,472	58,76806926	1,231931	0,246386148
0	20000	20000	0	3500	0	0	0	19000	32,972	58,11874884	1,881251	0,376250233
0	20000	20000	0	3500	0	3000	0	0	48,972	57,44848259	2,551517	0,510303482
0	20000	20000	3500	3500	0	0	0	0	48,472	57,46942841	2,530572	0,506114318
0	20000	20000	0	0	3000	3000	0	0	49,472	57,42753677	2,572463	0,514492646
0	20000	20000	0	0	0	3000	0	19000	33,472	58,09780302	1,902197	0,380439397
0	20000	20000	0	0	0	0	0	19000	36,472	57,9721281	2,027872	0,405574381
0	20000	20000	0	0	0	3000	0	0	52,472	57,30186185	2,698138	0,53962763
0	20000	20000	0	3500	0	0	0	0	51,972	57,32280767	2,677192	0,535438466
0	20000	20000	0	0	0	0	0	0	55,472	57,17618693	2,823813	0,564762614
0	0	20000	0	3500	0	3000	19000	19000	30,972	58,20253212	1,797468	0,359493577
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	46,972	57,53226587	2,467734	0,493546826

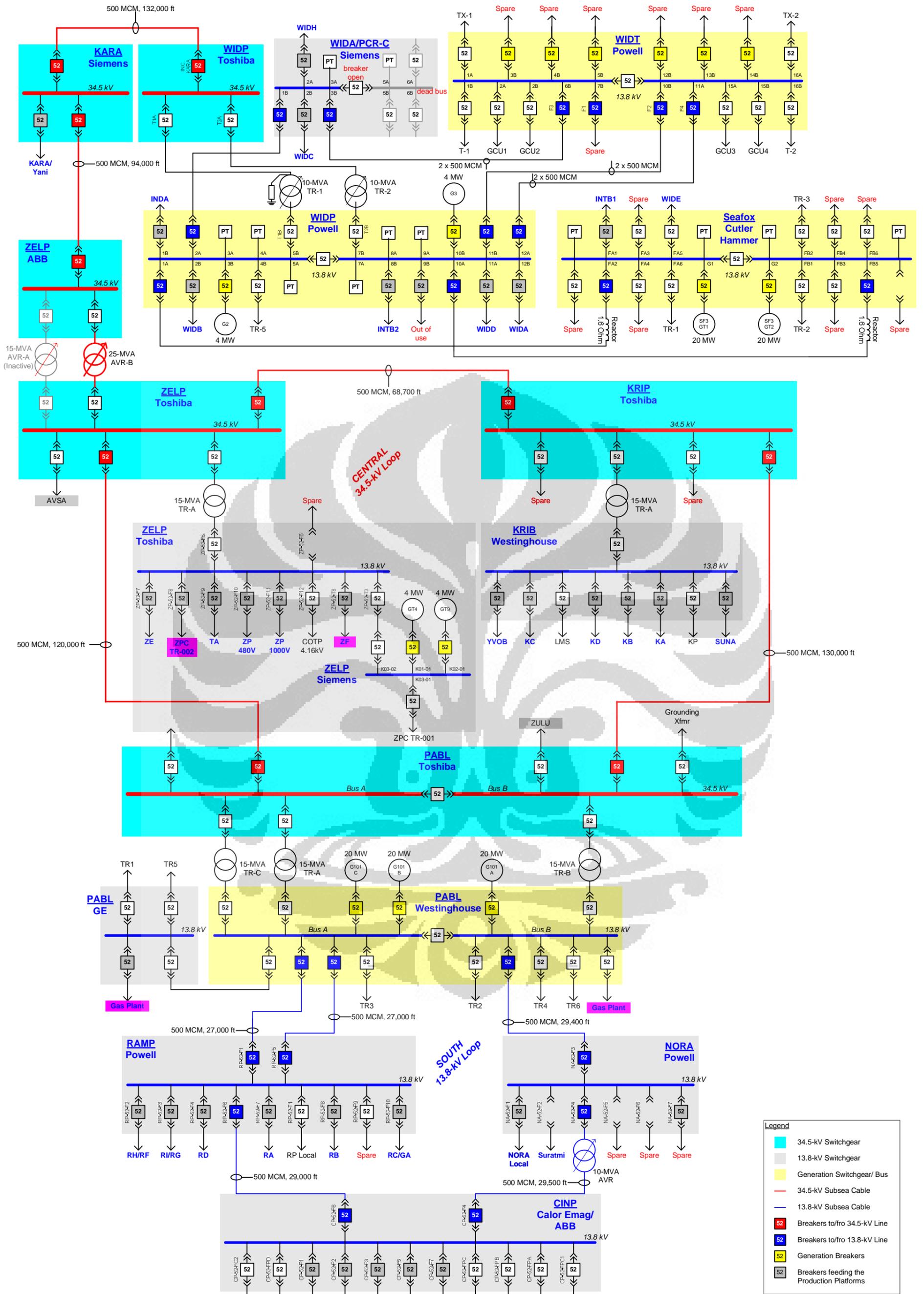
G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	f beban lepas	Δf	df/dt pemulihan
0	0	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	46,472	57,55321169	2,446788	0,489357662
0	0	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	31,472	58,1815863	1,818414	0,363682741
0	0	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	30,472	58,22347794	1,776522	0,355304413
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	62,472	56,88294545	3,117055	0,62341091
0	0	20000	0	0	0	3000	19000	19000	34,472	58,05591138	1,944089	0,388817725
0	0	20000	0	0	3000	3000	0	19000	50,472	57,38564513	2,614355	0,522870974
0	0	20000	0	3500	0	0	19000	19000	33,972	58,0768572	1,923143	0,384628561
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	0	65,972	56,73632471	3,263675	0,652735059
0	0	20000	3500	3500	0	0	0	19000	49,472	57,42753677	2,572463	0,514492646
0	0	20000	3500	3500	0	3000	0	0	65,472	56,75727053	3,242729	0,648545895
0	0	20000	0	0	0	3000	19000	19000	34,472	58,05591138	1,944089	0,388817725
0	0	20000	0	0	0	0	19000	19000	37,472	57,93023646	2,069764	0,413952709
0	0	20000	0	3500	0	3000	0	0	68,972	56,61064979	3,38935	0,677870043
0	0	20000	0	3500	0	0	0	19000	52,972	57,28091603	2,719084	0,543816794
0	0	20000	3500	3500	0	0	0	0	68,472	56,63159561	3,368404	0,673680879
0	0	20000	0	0	3000	3000	0	0	69,472	56,58970397	3,410296	0,682059207
0	0	20000	0	0	0	0	0	19000	56,472	57,13429529	2,865705	0,573140942
0	0	20000	0	0	3000	0	0	0	72,472	56,46402904	3,535971	0,707194191
0	0	20000	0	3500	0	0	0	0	71,972	56,48497487	3,515025	0,703005027
0	0	20000	0	0	0	0	0	0	75,472	56,33835412	3,661646	0,732329175

Perhitungan Beban Lepas pada Setiap Kombinasi Generator Lepas

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	df/dt pemulihan	Beban Dilepas (MW)
14824	14824	14824	3500	3500	3000	3000	19000	19000	-		
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	19000	19000	4,472	0,137467883	4,994639145
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	19000	19000	7,972	0,166792031	8,606126624
0	20000	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	11,472	0,196116179	12,2176141
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	19000	19000	7,472	0,162602867	8,090199841
0	20000	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	10,472	0,187737851	11,18576054
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	23,472	0,296656116	24,59985689
0	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	42,472	0,455844349	44,20507463
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	19000	19000	24,472	0,305034444	25,63171045
0	0	20000	0	3500	3000	3000	19000	19000	27,972	0,334358592	29,24319793
0	0	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	31,472	0,363682741	32,85468541
0	0	20000	3500	3500	0	3000	19000	19000	27,472	0,330169428	28,72727115
0	0	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	30,472	0,355304413	31,82283185
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	43,472	0,464222677	45,2369282
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	0	65,972	0,652735059	68,45363342
16272,4	16272,3	16272,3	0	3500	3000	3000	19000	19000	-0,845	0,092920313	-0,845
17501	17500	17501	0	0	3000	3000	19000	19000	-1,03	0,091370322	-1,03
17366	17366	17366	0	3500	0	3000	19000	19000	-1,126	0,090566003	44,4968
20000	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	6,972	0,158413703	7,574273058
18595	18594	18594	0	0	0	3000	19000	19000	-1,311	0,089016012	-1,311
18460	18460	18459	0	3500	0	0	19000	19000	-1,407	0,088211692	-1,407
20000	20000	20000	0	3500	0	3000	0	19000	9,972	0,183548687	10,66983375
20000	20000	20000	0	0	3000	3000	0	19000	10,472	0,187737851	11,18576054
20000	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	0	25,972	0,317601936	27,1794908
19688	19688	19688	0	0	0	0	19000	19000	-1,592	0,086661702	44,0308
20000	20000	20000	0	0	0	3000	0	19000	13,472	0,212872836	14,28132123
20000	20000	20000	0	0	3000	3000	0	0	29,472	0,346926085	30,79097828
20000	20000	20000	0	3500	0	3000	0	0	28,972	0,34273692	30,2750515
20000	20000	20000	0	0	0	3000	0	0	32,472	0,372061069	33,88653898
20000	20000	20000	0	0	0	0	0	19000	16,472	0,23800782	17,37688193

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	df/dt pemulihan	Beban Dilepas (MW)
20000	20000	20000	0	3685	0	0	0	0	31,787	0,366321914	33,17971928
20000	20000	20000	0	0	0	0	0	0	35,472	0,397196053	36,98209967
16138	16138	16137	3500	3500	0	3000	19000	19000	-0,941	0,092115993	-0,941
17232	17231	17231	3500	3500	0	0	19000	19000	-1,222	0,089761683	-1,222
20000	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	6,472	0,154224539	7,058346276
20000	20000	20000	3500	3500	0	0	0	19000	9,472	0,179359523	10,15390697
20000	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	0	25,472	0,313412772	26,66356402
20000	20000	20000	3500	3500	0	0	0	0	28,472	0,338547756	29,75912472
20000	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	19000	3,472	0,129089555	3,962785579
20000	20000	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	22,472	0,288277788	23,56800332
0	20000	20000	0	3500	0	3000	19000	19000	10,972	0,191927015	11,70168732
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	26,972	0,325980264	28,21134437
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	26,472	0,3217911	27,69541758
0	20000	20000	0	0	0	3000	19000	19000	14,472	0,221251164	15,3131748
0	20000	20000	0	0	3281	3000	0	19000	30,191	0,352950102	31,53288099
0	20000	20000	0	3500	3000	3000	0	0	45,972	0,485168497	47,81656211
0	20000	20000	3500	3500	0	3000	0	0	45,472	0,480979333	47,30063533
0	20000	20000	0	3500	0	3000	0	19000	29,972	0,351115249	31,30690506
0	20000	20000	3500	3500	0	0	0	19000	29,472	0,346926085	30,79097828
0	20000	20000	0	3500	0	0	19000	19000	13,972	0,217062	14,79724802
0	20000	20000	0	0	0	0	19000	19000	17,472	0,246386148	18,4087355
0	20000	20000	0	3500	0	0	0	19000	32,972	0,376250233	34,40246576
0	20000	20000	0	3500	0	3000	0	0	48,972	0,510303482	50,91212281
0	20000	20000	3500	3500	0	0	0	0	48,472	0,506114318	50,39619602
0	20000	20000	0	0	3000	3000	0	0	49,472	0,514492646	51,42804959
0	20000	20000	0	0	0	3000	0	19000	33,472	0,380439397	34,91839254
0	20000	20000	0	0	0	0	0	19000	36,472	0,405574381	38,01395324
0	20000	20000	0	0	0	3000	0	0	52,472	0,53962763	54,52361029
0	20000	20000	0	3500	0	0	0	0	51,972	0,535438466	54,0076835
0	20000	20000	0	0	0	0	0	0	55,472	0,564762614	57,61917098
0	0	20000	0	3500	0	3000	19000	19000	30,972	0,359493577	32,33875863
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	19000	46,972	0,493546826	48,84841568

G101A	G101B	G101C	G4	G9	Gen 14	Gen 21	SFX1	SFX2	MW	df/dt pemulihan	Beban Dilepas (MW)
0	0	20000	3500	3500	0	3000	0	19000	46,472	0,489357662	48,33248889
0	0	20000	0	0	3000	3000	19000	19000	31,472	0,363682741	32,85468541
0	0	20000	3500	3500	0	0	19000	19000	30,472	0,355304413	31,82283185
0	0	20000	3500	3500	3000	3000	0	0	62,472	0,62341091	64,84214594
0	0	20000	0	0	0	3000	19000	19000	34,472	0,388817725	35,95024611
0	0	20000	0	0	3000	3000	0	19000	50,472	0,522870974	52,45990316
0	0	20000	0	3500	0	0	19000	19000	33,972	0,384628561	35,43431933
0	0	20000	0	3500	3000	3000	0	0	65,972	0,652735059	68,45363342
0	0	20000	3500	3500	0	0	0	19000	49,472	0,514492646	51,42804959
0	0	20000	3500	3500	0	3000	0	0	65,472	0,648545895	67,93770664
0	0	20000	0	0	0	3000	19000	19000	34,472	0,388817725	35,95024611
0	0	20000	0	0	0	0	19000	19000	37,472	0,413952709	39,0458068
0	0	20000	0	3500	0	3000	0	0	68,972	0,677870043	71,54919412
0	0	20000	0	3500	0	0	0	19000	52,972	0,543816794	55,03953707
0	0	20000	3500	3500	0	0	0	0	68,472	0,673680879	71,03326733
0	0	20000	0	0	3000	3000	0	0	69,472	0,682059207	72,0651209
0	0	20000	0	0	0	0	0	19000	56,472	0,573140942	58,65102455
0	0	20000	0	0	3000	0	0	0	72,472	0,707194191	75,16068159
0	0	20000	0	3500	0	0	0	0	71,972	0,703005027	74,64475481
0	0	20000	0	0	0	0	0	0	75,472	0,732329175	78,25624229



Legend		
	34.5-kV Switchgear	
	13.8-kV Switchgear	
	Generation Switchgear/ Bus	
	34.5-kV Subsea Cable	
	13.8-kV Subsea Cable	
	Breakers to/fro 34.5-kV Line	
	Breakers to/fro 13.8-kV Line	
	Generation Breakers	
	Breakers feeding the Production Platforms	

Condition as per May 25, '10



Drawing Title

CNOOC SIMPLIFIED ONE LINE DIAGRAM

Simulasi pelepasan..., Ari Nugraheni, FT UI, 2011

Single Line Diagram

Drawing by GY/ Sep 26, 06	Update by GJA/ Mar 04, 11	Revision 5
------------------------------	------------------------------	---------------